Avances de investigación para **la agroindustria panelera**

Oscar Andrés Mendieta Menjura
Compilador



AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Avances de investigación para **la agroindustria panelera**

Oscar Andrés Mendieta Menjura
Compilador



AGROSAVIA
EDITORIAL

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Avances de investigación para la agroindustria panelera. / Oscar Andrés Mendieta Menjura [y otros cincuenta y seis] – Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2024.

538 páginas (Colección Estudios Agropecuarios)

Incluye referencias bibliográficas, ilustraciones y gráficos.

ISBN e-Book: 978-958-740-750-1

1. *Saccharum officinarum* 2. Agroindustria 3. Biofertilizantes 4. Enfermedades de las plantas 5. Transporte 6. Eficiencia energética 7. Aspectos socioeconómicos 8. Producción 9. Sostenibilidad.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
(AGROSAVIA)
Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera.
Código postal 250047, Colombia.
Centro de Investigación Tibaitatá. Sede Cimpa. Kilómetro 2 vía antigua a Cipe, Barbosa, Santander.
Código postal 051020, Colombia.
Centro de Investigación Nataima. Kilómetro 9, vía Espinal-Chicoral, Tolima.
Código postal 733520, Colombia.
Centro de Investigación La Selva, sede Eje Cafetero
Centro de Investigación La Libertad. Kilómetro 17, Vía Puerto López, Meta.
Código postal 502008, Colombia.

Esta publicación se deriva de los principales resultados de investigación obtenidos en las agendas dinámicas y proyectos transversales de AGROSAVIA, ejecutados en los periodos 2013-2017 y 2018-2021; los cuales fueron financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR).

Colección: Estudios Agropecuarios
Tipología: Obras de Investigación

Fecha de recepción: 8 de septiembre de 2022
Fecha de evaluación: 29 de septiembre de 2022
Fecha de aceptación: 8 noviembre 2022

Publicado: septiembre de 2024

Preparación editorial

Editorial Agrosavia
editorial@agrosavia.co
Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz
Edición: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Alejandro Merlano Aramburo
Diseño: Mónica Cabiativa Daza
Diagramación: Diego Abello Rico

Mendieta Menjura, O. A. (Ed.). (2024). *Avances de investigación para la agroindustria panelera.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7407501

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13


3

Contenido



Los autores 19

Prólogo 49

Introducción 51

Componente I Manejo agronómico, corte y transporte de la caña de azúcar para panela **55**

Capítulo 1. Avances conceptuales sobre semilla de caña de azúcar para panela 57

Capítulo 2. Biofertilización de caña de azúcar para panela en la Hoya del Río Suárez con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) 87

Capítulo 3. Barrenadores del tallo asociados al cultivo de caña de azúcar para panela en Colombia 113

Capítulo 4. Enfermedades prevalentes en variedades de caña de azúcar para panela y su relación con factores abióticos en Boyacá y Santander 137

Capítulo 5. Mapeo digital de los suelos de la región de la Hoya del Río Suárez 169

Capítulo 6. Sistema de transporte por cable para caña de azúcar en la producción de panela validado en zona de ladera 195

Capítulo 7. Aptitud de uso de la tierra para el cultivo de caña de azúcar y la producción de panela en Cundinamarca: de la transformación local al mercado regional 213

Componente II. Eficiencia energética, calidad y diversificación del uso de subproductos y derivados del proceso de producción de panela **237**

Capítulo 8. Diseño y dimensionamiento de una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa mejorada 239

Capítulo 9. Diseño de un intercambiador de calor semicilíndrico con aletas para la producción de azúcar no centrifugada de caña 253

Capítulo 10. Modelo híbrido de evaporación para la producción de azúcar no centrifugada de caña de azúcar 273

Capítulo 11. Sistema experto para el diseño de hornillas térmicamente eficientes (HornillApp) 289

Capítulo 12. Potencial terapéutico de derivados de caña de azúcar en la regeneración de la piel: cultivo 2D 305

Capítulo 13. Revisión del aprovechamiento de los residuos generados en la agroindustria panelera vía digestión anaeróbica 321

Componente III. Importancia socioeconómica y ambiental de la agroindustria panelera 339

Capítulo 14. Costos y beneficios económicos de la agroindustria panelera en Colombia 341

Capítulo 15. Indicadores ambientales del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar para la producción de panela en Cundinamarca 363

Capítulo 16. Calidad de vida en el trabajo: análisis de experiencias en la agroindustria panelera 391

Capítulo 17. La agroindustria panelera y su contribución al desarrollo de San José de Pare, Boyacá (Colombia) 409

Capítulo 18. Tipología de unidades de producción de panela en Colombia 427

Capítulo 19. Implementación de un proceso de producción de piloncillo a nivel piloto como estrategia de capacitación de recursos humanos especializados 455

Capítulo 20. Sostenibilidad de la producción de piloncillo en México 473

Capítulo 21. La panela en El Salvador, hacia un emergente sistema sectorial de innovación y producción: estudio de caso Acopanela 491

Capítulo 22. Internacionalización de la gestión del conocimiento en el Convenio de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (Cimpa) 515

Lista de figuras

Figura 1.1. Esquema general de propagación de esquejes de caña de azúcar para panela 64

Figura 1.2. Esquema general de propagación de cogollo de caña de azúcar para panela 65

Figura 1.3. Esquema general de propagación de yemas embolsadas de caña de azúcar para panela 65

Figura 1.4. Esquema general e infraestructura instalada en AGROSAVIA para producir plantas germinadas de caña de azúcar para panela 66

Figura 1.5. Etiqueta modelo para la identificación de semilla seleccionada. 69

Figura 1.6. Plantas germinadas del cultivar de caña de azúcar CC 93-7711, 90 DDS, producidas bajo las condiciones agroecológicas de Barbosa, Santander 70

Figura 1.7. Precipitación promedio (mm) registrada en el periodo 2016-2018 y meses de evaluación y producción de la semilla seleccionada o las plantas germinadas. 71

Figura 1.8. Características de las yemas de la caña para la extracción 76

Figura 1.9. Esquema de producción de semilla de calidad y semilleros 80

Figura 2.1. Hussain et al., 2017; Mthimkhulu et al., 2016 Municipios de Colombia donde fueron tomadas las muestras de suelo para el aislamiento de HFMA 93

Figura 2.2. Número de esporas de HFMA/g de suelo y riqueza de especies (*I*) presentes en suelos cultivados con caña de azúcar para panela en diferentes departamentos de Colombia 98

Figura 2.3. Diversidad de esporas de HFMA encontradas en suelos paneleros 100

Figura 2.4. Validación de la fertilización integral en parcelas semicomerciales establecidas en los municipios de Ocamonte, Chitaraque y Oiba sobre la producción de caña y panela (t/ha) 103

Figura 2.5. Costos por tonelada de panela para las variedades y los municipios estudiados con dos tratamientos de fertilización: integral y convencional 105

Figura 3.1. Larvas y adultos de las especies del barrenador halladas 119

Figura 3.2. Plantas arvenses de la familia *Asteraceae* que proveen refugio y alimento a los parasitoides en cultivos de caña para panela 125

Figura 3.3. Barrenador listado *E. insuastii* 127

Figura 3.4. Barrenador menor *B. graminea* 128

Figura 3.5. Estados de desarrollo de *M. smerintha* 129

Figura 3.6. Parasitoides de barrenadores de caña para panela 130

Figura 4.1. Ubicación geográfica del área de estudio en Santander y Boyacá, y puntos de muestreo de las tres variedades comerciales de caña: CC 01-1940, CC 93-7711 y RD 75-11 141

Figura 4.2. Temperatura media del aire promedio por trimestre en el área de estudio. 148

Figura 4.3. Brillo solar anual en el área de estudio. 149

Figura 4.4. Pústulas generadas por *P. melanocephala* en la variedad CC 93-7711 150

Figura 4.5. Asociación de la prevalencia de la roya café con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 151

Figura 4.6. Pústulas generadas por *P. kuehnii* en dos variedades de caña: lesiones avanzadas coalescentes con esporulación abundante 152

Figura 4.7. Asociación de la prevalencia de la roya naranja con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 153

Figura 4.8. Lesiones características ocasionadas por *L. sacchari* 154

Figura 4.9. Asociación de la prevalencia de la mancha de anillo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 155

Figura 4.10. Presencia de *B. sacchari en caña* 155

Figura 4.11. Asociación de la prevalencia de la mancha de ojo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 156

Figura 4.12. Lesiones ocasionadas por *C. falcatum* en la variedad RD 75-11 157

Figura 4.13. Asociación de la prevalencia del muermo rojo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 158

Figura 4.14 Asociación de la prevalencia del virus de la hoja amarilla con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos 159

Figura 5.1. Zona de estudio y distribución de los puntos de muestreo 173

Figura 5.2. Triángulo textural de las fracciones de arcilla (Ar), arena (A) y limo (L) de los suelos de la HRS, según la clasificación de la USDA 179

Figura 5.3. Distribución espacial y distribución del error de predicción de las propiedades de suelo en la HRS 184

Figura 5.4. Representación gráfica mediante IDW del comportamiento de las propiedades de suelo en la HRS 185

Figura 6.1. Sistemas de transporte por cable por efecto de la gravedad 198

Figura 6.2. Sistemas de transporte por cable motorizados o autopropulsados 199

Figura 6.3. Condiciones topográficas de la finca El Placer y trazado de la línea del sistema autopropulsado con tramos 201

Figura 6.4. Torres intermedias de soporte del cable (color verde), pinzas y gancho de carga (color amarillo); proceso de ubicación de un paquete de caña en el gancho de la pinza 203

Figura 6.5. Descarga del paquete de caña 205

Figura 7.1. Mapa de aptitud para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca 220

Figura 7.2. Mapa de aptitud del componente físico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca 222

Figura 7.3. Mapa de aptitud del componente socioeconómico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca 225

Figura 7.4. Mapa de aptitud del componente socioecosistémico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca 227

Figura 7.5. Cadena de valor *de facto* para el cultivo de caña panelera 228

Figura 8.1. Diseño del modelo de cámara de combustión Ward-Cimpa mejorado 243

Figura 8.2. Diseño propuesto para la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada. 245

Figura 8.3. Temperatura y movimiento de los gases en la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada, con superficies radiantes en los arcos inferior y superior 247

Figura 9.1. Módulo de producción de panela 258

Figura 9.2. Perfil de temperatura en el subdominio de gases de combustióna 266

Figura 9.3. Perfil de temperatura promedio por plano transversal en PSA y PS 267

Figura 9.4. Contornos de flujo de calor 268

Figura 9.5. Modelo de hornilla construido que incluye la PSA 269

Figura 10.1. Modelo de hornilla utilizado para la implementación del sistema híbrido de evaporación 277

Figura 10.2. Sistema de recuperación y aprovechamiento de calor 278

Figura 10.3. Hornilla con el sistema híbrido de evaporación 283

Figura 10.4. Análisis de sensibilidad del tiempo de recuperación de la inversión de la hornilla con sistema híbrido de evaporación en función del precio de la panela (ANC) 287

Figura 11.1. Funcionamiento de HornillApp 296

Figura 11.2. Análisis económico de la hornilla con y sin recuperador de calor 298

Figura 11.3. Datos demográficos de los usuarios de HornillApp 299

Figura 12.1. Citotoxicidad de los extractos de los derivados de caña de azúcar 314

Figura 12.2. Hemocompatibilidad de los extractos de los derivados de caña de azúcar 315

Figura 12.3. Actividad antibacteriana de los extractos de los derivados de caña de azúcar 316

Figura 12.4. Evaluación de cierre de la herida 317

Figura 13.1. Mapa temático conceptual de la DA en la agroindustria de la panela 329

Figura 14.1. Agrupación *k-means* de la distribución porcentual de los costos de producción de panela 351

Figura 14.2. Comportamiento de la producción anual de panela y precio pagado al productor en Colombia durante el periodo 1999-2020 357

Figura 14.3. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 1 357

Figura 14.4. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 2 358

Figura 14.5. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 3 359

Figura 15.1. Diagrama de flujo del procedimiento en campo para medir la erosión hídrica superficial 373

Figura 15.2. Huella de carbono por operación en los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca 378

Figura 15.3. Pérdida de suelo en distintos momentos de medición asociados al corte 383

Figura 17.1. Tamaño de las fincas paneleras del municipio de San José de Pare, con trapiches adecuados y sin adecuar 415

Figura 17.2. Frecuencia de la molienda en los trapiches paneleros del municipio de San José de Pare 416

Figura 18.1. Departamentos de Colombia seleccionados para la clasificación de las UP de panela 430

Figura 18.2. Distribución de las encuestas 432

Figura 18.3. Uso de subproductos y residuos en el sistema productivo de caña de azúcar para producción de panela 439

Figura 18.4. Importancia de las variables en las dimensiones 1, 2 y 3 del afdm, de acuerdo con el coeficiente Cos2 440

Figura 18.5. Agrupamiento de los productores de caña panelera de acuerdo con características similares, usando el análisis de conglomerados 441

Figura 19.1. Planeación y proyección de la construcción del horno para producir piloncillo 459

Figura 19.2. Puesta en marcha del horno para producir piloncillo 462

Figura 19.3. Capacitación en elaboración de piloncillo 464

Figura 20.1. Piloncillo mexicano tipo cono grande según la calidad (negro, trigueño, café y blanco) 476

Figura 20.2. Producción de piloncillo en la región Huasteca, San Luis Potosí y Veracruz (México) 478

Figura 20.3. Antigua hacienda piloncillera en Córdoba, Veracruz 479

Figura 21.1. Bases de conocimiento y sectores industriales 494

Figura 21.2. Actores del sistema sectorial de innovación y producción de la agroindustria del azúcar no centrifugada en El Salvador 501

Figura 21.3. Bosquejo del sistema sectorial de innovación y producción de la caña de azúcar en El Salvador como unión de varios sistemas de innovación tecnológicos 503

Figura 22.1. El papel del Cimpa como OIC internacional 519



Lista de tablas

Tabla 1.1. Periodo y contribución de AGROSAVIA para consolidar las bases conceptuales y prácticas de la producción de semilla de calidad 62

Tabla 1.2. Relación entre la edad y el número de yemas viables por hectárea de caña de la variedad CC 93-7711 cultivada en dos localidades de Santander 74

Tabla 1.3. Descripción y valores asociados a la I. I. causada por *Diatraea* spp. 78

Tabla 1.4. Porcentaje de la I. I. de *Diatraea* spp. registrado en semilleros del cultivar CC 93-7711 en las provincias de Vélez y Guanentá (Santander) 79

Tabla 2.1. Fuentes y dosis de la fertilización recomendada empleada en las parcelas semicomerciales 96

Tabla 2.2. Estructura de costos de producción con el tratamiento del agricultor (T2) y con fertilización integral (T1) 102

Tabla 3.1. Duración y supervivencia de los estados de desarrollo de las cuatro especies del género *Diatraea* criadas en dieta artificial en condiciones de laboratorio (25 ± 2 °C; 60 ± 10 % de humedad relativa; fotoperiodo: 12/12) 120

Tabla 3.2. Especies de parasitoides y porcentaje de parasitismo sobre larvas de barrenadores del tallo en siete departamentos productores de caña de azúcar para panela 122

Tabla 3.3. Plan de liberación de parasitoides para control de los barrenadores de caña de azúcar para panela según la intensidad de infestación observada en la cosecha anterior (sistema de corte por parejo) 125

Tabla 4.1. Variables categorizadas para el ACM 144

Tabla 4.2. Precipitación promedio acumulada (mm) por trimestre y multianual en el área de estudio 147

Tabla 4.3. Humedad relativa promedio (%) por trimestre en el área de estudio 148

Tabla 5.1. Covariables predictoras según factor de formación 175

Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos de las propiedades de los suelos (0-15 cm) de la HRS 178

Tabla 5.3. Importancia de las covariables (*top* 5) para las propiedades mapeadas 180

Tabla 5.4. Parámetros de bondad de ajuste para cada modelo entrenado en cada propiedad de estudio 181

Tabla 6.1. Ficha técnica del STCA 204

Tabla 6.2. Costos de transporte de caña para la producción de 15 t de panela, mediante el sistema tradicional de transporte en mulas, en la finca El Placer, en Santana, Boyacá 207

Tabla 6.3. Costos de transporte de caña para la producción de 15 t de panela, mediante el sistema combinado de cable y mulas, en la finca El Placer, en Santana, Boyacá 208

Tabla 7.1. Componentes y criterios para la evaluación del TUT 218

Tabla 8.1. Datos de entrada para la simulación de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada 244

Tabla 8.2. Parámetros de la combustión del bagazo en lecho fijo con la cámara Ward-Cimpa mejorada 248

Tabla 9.1. Geometría, dominios computacionales y calidad de malla 261

Tabla 9.2. Condiciones de frontera por subdominio computacional 262

Tabla 9.3. Propiedades termodinámicas y de transporte en los subdominios 263

Tabla 9.4. Temperatura experimental y simulada 266

Tabla 9.5. Potencia térmica y flujo de calor 268

Tabla 10.1. Datos de entrada para el diseño de una hornilla con sistema híbrido de evaporación 277

Tabla 10.2. Resultados del balance de materia para la hornilla de 90 kg de ANC/h con un molino Apolo 4C 281

Tabla 10.3. Resultados del balance de energía para la hornilla de 90 kg de ANC/h y áreas de transferencia de calor de los intercambiadores 282

Tabla 10.4. Resultados de desempeño energético, productivo y ambiental de una hornilla con y sin SRC 284

Tabla 10.5. Energía aprovechada en los intercambiadores de calor de la hornilla con sistema híbrido de evaporación 284

Tabla 10.6. Resultados de desempeño energético, productivo y ambiental de la hornilla tradicional inicial y con el sistema híbrido de evaporación 286

Tabla 14.1. Estructuras de costos de producción de panela analizadas por departamento, metodología de captura de información y fuente 345

Tabla 14.2. Estructura de costos para la producción de un kilogramo de panela según la tecnología 352

Tabla 14.3. IE del precio de la panela en Colombia: análisis mensual del periodo 1999-2020 355

Tabla 15.1. Características de los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca 367

Tabla 15.2. Estimación de las cargas ambientales en los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca 376

Tabla 15.3. Características físicas del suelo de los lotes seleccionados para la medición de la erosión hídrica superficial en caña de azúcar para panela en Quebradanegra, Cundinamarca 381

Tabla 15.4. Factores C estimados para los sistemas de corte y los momentos de medición 384

Tabla 16.1. Datos sociodemográficos 397

Tabla 16.2. Aportes de la organización del trabajo a la satisfacción de los trabajadores 399

Tabla 16.3. Caracterización del bienestar laboral 399

Tabla 16.4. Evolución laboral de los trabajadores en los últimos años 401

Tabla 16.5. Efectos colaterales del trabajo 403

Tabla 16.6. Análisis comparativo entre las respuestas dadas por hombres y mujeres a las diferentes variables 404

Tabla 17.1. Resumen de los costos de producción de los trapiches, por categoría, en COP 420

Tabla 17.2. Cálculo de la ganancia en las unidades productoras de panela según el número de moliendas por año 421

Tabla 18.1. Variables cualitativas incluidas en la caracterización y determinación de las tipologías de UP de panela 434

Anexo 18.1. Porcentaje de varianza acumulada en el análisis factorial para datos mixtos (AFDM) 449

Anexo 18.2. Comparación entre los tipos de UP de panela 450

Tabla 19.1. Colores L*a*b* de dos muestras de piloncillo (una por cada variedad utilizada) 467

Los autores

Oscar Andrés Mendieta Menjura
Correo: omendieta@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2517-212X

Ingeniero químico de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia. En 2009 fue joven investigador del Minciencias, en AGROSAVIA. En 2012 obtuvo el título de máster en Ingeniería Química por la misma universidad, y se incorporó a AGROSAVIA como investigador. A partir de ahí, propuso y desarrolló varios proyectos para la agroindustria panelera orientados a mejorar la eficiencia energética del proceso y las buenas prácticas de manufactura. En 2016 fue beneficiario del Minciencias para realizar estudios de posgrado en Colombia, y así, en 2021, obtuvo el título de doctor en Ingeniería Química de la UIS. En su tesis propuso la digestión anaeróbica como una alternativa sostenible para la gestión y valorización de residuos agroindustriales. Actualmente trabaja como investigador PhD en la sede Cimpa, adscrita al Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Julio Ramírez Durán
Correo: jramirezd@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3385-5748

Ingeniero agrónomo y magíster en Desarrollo Rural de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Cuenta con experiencia en procesos de investigación en varias especies agrícolas de importancia social y económica para Colombia, especialmente en la producción de semilla de calidad; asimismo, tiene experiencia en procesos de transferencia de tecnología y asistencia técnica, además de capacidad y trayectoria en coordinación y liderazgo de equipos técnicos y proyectos de investigación a

nivel nacional. Actualmente es jefe del Departamento de Semillas de AGROSAVIA y líder del Plan Nacional de Semillas.

Jose Luis Tauta-Muñoz
Correo: jtauta@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2837-4931

Ingeniero agrícola y magíster en Ciencias Agrarias, con énfasis en suelos y aguas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Trabajó en proyectos de investigación en temas asociados con cambio climático e investigación participativa con la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Está vinculado a AGROSAVIA desde 2015, como profesional de apoyo a la investigación, en la Red de Innovación de Cultivos Transitorios y Agroindustriales, donde ha trabajado en proyectos de investigación sobre indicadores ambientales y de sostenibilidad, servicios ecosistémicos, análisis de cadena de valor y análisis espacial de indicadores de calidad física y química de suelos.

Diego Hernando Flórez Martínez
Correo: dhflorez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1246-6513

Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Industrial y doctor en Ingeniería-Industria y Organizaciones de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente se desempeña como jefe del Departamento de Inteligencia y Divulgación Científica y Tecnológica de AGROSAVIA, donde lidera las líneas de investigación en inteligencia y vigilancia estratégica para la I + D + i; divulgación pública de la ciencia, y gestión de datos e información científica. Su área de conocimiento y experticia abarca las líneas de gestión del conocimiento, vigilancia e inteligencia competitiva, planeación estratégica, cienciometría, prospectiva estratégica y análisis de cadenas productivas y megatendencias, y diseño de metodologías de planeación estratégica a medida (*tailored methodologies*). Es investigador asociado reconocido por el Minciencias.

Juan Carlos Lesmes Suárez
Correo: jlesmes@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1322-2783

Ingeniero agrónomo y magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, con énfasis en desarrollo social y humano, de la Universidad de Manizales. Tiene experiencia en manejo integrado de cultivos de guayaba y caña para las agroindustrias del bocadillo y la panela, en evaluación e implementación de alternativas de transporte y en mecanización de suelos en ladera. Ha participado en la transferencia de ofertas tecnológicas en temas relacionados con maquinaria y equipos para la agroindustria panelera, manejo de plagas y enfermedades en cultivos de guayaba y manejo del sistema de información abierto, con el valor nutricional de recursos forrajeros como alimento. Actualmente es profesional de apoyo a la investigación en la sede Cimpa, del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Douglas Andrés Gómez Latorre
Correo: dagomez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6067-7596

Ingeniero catastral y geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y magíster en Ciencias-Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia. Es investigador máster asociado del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, donde se desempeña en el área de agroclimatología, enfocando su trabajo en análisis del riesgo agroclimático y en climatología aplicada a la agricultura (procesamiento y análisis de información climática). En la actualidad cuenta con publicaciones sobre análisis biofísicos.

Luz Esperanza Prada Forero
Correo: lprada@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2875-6526

Magíster en Ingeniería Química. Su desempeño profesional se ha centrado en la caracterización y desarrollo de nuevos produc tos agroindustriales y tecnologías para el proceso, análisis, mejo-ramiento e inocuidad de las industrias de la guayaba y la caña de azúcar. Estos desarrollos buscan facilitar el trabajo de producción, mejoramiento y obtención de productos que cumplan con las necesidades de la sociedad en aspectos comerciales, energéticos y ambientales.

Mónica Cuellar Entrena
Correo: m.cuellar11@uniandes.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1617-0816

Bioquímica de la Universidad Estatal de San Francisco (Estados Unidos) y magíster en Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Actualmente es investigadora asociada de la empresa BioTissue en Miami (Estados Unidos). Tiene experiencia en cultivos celulares, desarrollo de biomateriales a partir de matriz extracelular y evaluación biológica de materiales y compuestos con potencial terapéutico. Estuvo involucrada en el proyecto de evaluación de extractos de caña de azúcar para producción de panela y sus derivados, y su potencial en la regeneración de heridas en modelos *in vitro*. Actualmente trabaja en el área de regeneración a partir de tejidos donados después del nacimiento —como el cordón umbilical y la placenta— en BioTissue, donde se enfoca en la regeneración de heridas oculares y crónicas.

Laura Rueda Gensini
Correo: l.ruedag@uniandes.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0138-7393

Ingeniera biomédica y magíster en Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Empezó su doctorado en el German Cancer Research Center (DKFZ), que se encuentra afiliado a la

Heidelberg University (Alemania), donde trabaja en la división de ingeniería celular y modelos de enfermedad. Tiene experiencia en cultivos celulares, evaluación de biocompatibilidad y caracterización de biomateriales y biomoléculas, así como en el desarrollo de biotintas para la bioimpresión 3D basada en extrusión. Además, tiene conocimientos y experiencia técnica en la síntesis de grafeno y sus derivados, así como en su bioconjugación con otros biomateriales para aplicaciones de ingeniería de tejidos. Durante su vinculación a la Universidad de los Andes, trabajó en dos proyectos de investigación: 1) desarrollo de biotintas de matriz extracelular descelularizada (dECM) para su uso en bioimpresión 3D basada en extrusión, y 2) extracción, identificación y caracterización de biomoléculas terapéuticas potenciales a partir de caña de azúcar y sus derivados.

Juan Carlos Cruz Jiménez
Correo: jc.cruz@uniandes.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7790-7546

Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia y doctor en Ingeniería Química de la Universidad Estatal de Kansas (KSU) por su trabajo en una nueva plataforma para la inmovilización de enzimas para resolver retos de biocatálisis en medios no acuosos. Realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad Johns Hopkins. En la actualidad es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Ha trabajado en varios proyectos encaminados al uso de técnicas biofísicas de última generación para resolver preguntas en interacciones proteína-lípido. Lleva más de diez años trabajando en los campos de la biotecnología industrial y médica: desarrollo de nanobiocatalizadores, entendimiento fundamental de interacciones proteínaproteína, proteína-superficie y proteína-lípido, desarrollo de nuevos vehículos nanoparticulados para la liberación y guía de moléculas farmacológicas y búsqueda de nuevas moléculas con actividad de membrana. Es miembro del American Institute of

Chemical Engineers (AIChE) y la Biophysical Society. Es revisor de varias revistas indexadas, como *Bioresource Technology*, *Materials Chemistry and Physics*, *Biotechnology Progress*, *Materials Science and Engineering C* y *Journal of Biotechnology*.

Carolina Muñoz Camargo
Correo: c.munoz2016@uniandes.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6238-9021

Bióloga de la Pontificia Universidad Javeriana, y magíster en Ciencias Biológicas y doctora en Ciencias-Biología de la Universidad de los Andes por su trabajo en la identificación de péptidos antimicrobianos y sus mecanismos de acción dervados de microorganismos de la piel de ranas colombianas. Ha participado en estancias de investigación en la Universidad Hebrea de Jerusalén, en caracterización transcriptómica y proteómica de moléculas con potencial farmacológico, y en la Universidad Autónoma de Barcelona, en caracterización biológica y biofísica de nuevos péptidos antimicrobianos derivados de la piel de rana. En la actualidad es profesora asociada del Departamento de Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Tiene amplia experiencia en la implementación de plataformas *in vitro* celulares 2D y de tecnologías emergentes para el desarrollo de tejidos humanos como bioimpresión 3D. Continúa trabajando en la identificación y aislamiento de moléculas terapéuticas derivadas de la naturaleza. Es revisora de varias revistas indexadas, como *International Journal of Molecular Sciences*, *Frontiers in Oncology*, *Frontiers in Immunology* e *International Journal of Bioprinting*.

María Margarita Ramírez Gómez
Correo: mmramirez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7407-7321

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia, magíster en Microbiología de Suelos de la University of Wales (Reino Unido) y doctora en Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene amplia experiencia en el estudio de la simbiosis con rizobios y hongos formadores de micorrizas

arbusculares (HFMA). Sus investigaciones parten del aislamiento, identificación y selección de las mejores interacciones plantamicroorganismos en laboratorio, invernadero y campo; igualmente, ha liderado la formulación, escalamiento, registro y venta de siete bioproductos basados en microorganismos benéficos. Ha participado en numerosos proyectos de investigación y en la conformación, coordinación y puesta en marcha de los programas nacionales de manejo integrado de suelos y aguas, de recursos biofísicos, y en la Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes, así como en la Escuela de Pensamiento en Agricultura Tropical. Es la creadora y líder del grupo de investigación Raíces del Futuro. Actualmente se desempeña como investigadora PhD sénior del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Diana Paola Serralde Ordóñez
Correo: dserralde@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6422-5071

Profesional en Ecología de la Pontificia Universidad Javeriana y máster en Ciencias-Geofísica de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene experiencia en la relación planta-microorganismo-ambiente, especialmente en la simbiosis con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) y su respuesta nutricional en diferentes cultivos de interés agrícola y forestal. Ha participado en la evaluación de la capacidad de estos microorganismos como potenciales biocontroladores de enfermedades fitosanitarias, como el ataque por *Fusarium oxysporum* en uchuva, y como biorremediadores, por su capacidad para inmovilizar metales pesados en plantas de cacao y arroz. Adicionalmente, ha participado en la evaluación de la aplicación de métodos geofísicos en la agricultura como alternativas de bajo impacto para la prospección del subsuelo. Actualmente se desempeña como investigadora máster asociada del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Andrea María Peñaranda Rolón
Correo: apenaranda@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1231-646X

Ingeniera de producción biotecnológica de la Universidad Francisco de Paula Santander y máster en Ciencias Ambientales de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Cuenta con amplia experiencia en el estudio de hongos formadores de micorrizas y rizobios, y en su potencial como biofertilizantes en invernadero, vivero y campo. Ha participado en la formulación y ejecución de varios proyectos de investigación en especies frutícolas, leguminosas, forestales y transitorias, como la caña para producción de panela. Su experiencia profesional está enfocada en la evaluación de microorganismos con potencial biofertilizante y su impacto económico y ambiental en diversos cultivos. Actualmente se desempeña como investigadora máster del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Noé Aguilar Rivera
Correo: naguilar@uv.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7833-6749

Ingeniero químico con especialidad en celulosa y papel y maestro en Ciencias de Productos Forestales de la Universidad de Guadalajara (México), y doctor en Ciencias Ambientales, en el área de gestión ambiental, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México). Desarrolla la línea de investigación en gestión ambiental, desarrollo sostenible y economía circular en agroindustrias. Es docente investigador de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Veracruzana (México). Es autor de más de 150 artículos de investigación y divulgación científica, libros y capítulos de libros, y ha dirigido más de 25 tesis de licenciatura, maestría y doctorado.

Jaime Humberto Sierra González
Correo: jhsierra@javeriana.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3227-9635

Doctor en Negocios y Administración de The University of Manchester (Reino Unido); máster en Economía de la Internacionalización de la Empresa y las Finanzas de la Università di Roma Tor Vergata (Italia); magíster en Economía de la Pontificia Universidad Javeriana; con diploma en Relaciones Internacionales y Diplomacia de la Academia Diplomática de San Carlos, y licenciado en Educación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Es consultor en distintos proyectos para instituciones como el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), Colciencias, ISA, Bancóldex y el Ministerio de Industria de Italia, y cofundador y miembro de la Red GCTI y la Red InnovaMeso LatAm. Fue miembro de la Junta Directiva de la Fundación Escritores. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Administración de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Pontificia Universidad Javeriana. Cuenta con publicaciones científicas en varios libros y revistas, como *European Journal of Innovation Management*, *Journal of Banking and Finance*, *Latin American Business Review*, *Journal of Macromarketing*, *Journal of Economics*, *Finance and Administrative Science*, *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *Cuadernos de Administración* (PUJ) y *Revista Contaduría* (Universidad de Antioquia).

Ruy Edeymar Vargas Díaz
Correo: rvargas@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2609-4087

Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con maestría en Bioestadística de la Facultad de Ciencias de la misma universidad. Cuenta con más de diez años de experiencia en diferentes proyectos de investigación y transferencia de tecnología en temas referentes a manejo de aguas y suelos,

implementación y desarrollo de agricultura limpia y evaluación de cultivos como hortalizas, papa y tomate. Cuenta con conocimientos en análisis de datos con enfoque en estadística espacial. Tiene habilidades en el manejo de programas tradicionales como Word y Excel, en el sistema de composición de textos LaTeX y en el programa estadístico R. Ha contribuido en la escritura de artículos científicos publicados en revistas científicas internacionales en temáticas de geoestadística, rotación de cultivos y manejo fitosanitario del cultivo de papa. Actualmente es investigador máster del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Gilberto Alonso Murcia Contreras
Correo: gilbertomurcia@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1381-839X

Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, con maestría y doctorado en Ingeniería Agrícola, con enfoque en mecanización agrícola, de la Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Trabajó durante veintiún años en AGROSAVIA como investigador en las áreas de conservación de suelos, manejo integrado de suelos y aguas, y mecanización agrícola, especialmente en el diseño, construcción y evaluación de máquinas e implementos agrícolas para la agroindustria. Trabajó durante cuatro años en la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en proyectos de mecanización agrícola.

Elías Humberto Peraza Castaneda
Correo: elias.peraza@mined.gob.sv
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1900-0513

Licenciado en Administración de Empresas de la Universidad de El Salvador (UES), donde obtuvo el Premio a la Excelencia Académica Rubén Darío en 2009; magíster en Dirección Empresarial desde la Innovación e Internacionalización de la Universidad del País Vasco (España), y doctor en Economía con sobresaliente *cum laude* de las universidades de Burgos (UBU), Valladolid (UVa) y

Salamanca (USAL) (España). Su tesis doctoral se titula *La dinámica del sistema sectorial de innovación de la industria agroalimentaria en El Salvador desde una perspectiva evolucionista* (2019), y en ese periodo realizó una estancia de investigación en Ingenio (CSIC-UPV) y asistió a una *summer school* en The Association for Social Economics. También en 2019 realizó el curso Planning and Development of Science and Technology Parks (STP) Policy, and Technology Transfer and Commercialization, en el Science & Technology Policy Institute (Stepi) en Daejeon, Corea del Sur. En 2022 fue admitido como joven miembro afiliado a la Academia Mundial de Ciencias en el campo de ciencias sociales y económicas, y tomó parte como miembro del Consejo Editorial de la *Revista Colegiada de Ciencia*, de la Universidad de Panamá. Actualmente se desempeña como gerente de Prospectiva Tecnológica Educativa en el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de El Salvador. Académicamente, está interesado en el enfoque de sistemas de innovación (nacional, regional y sectorial) para los países en vías de desarrollo y en las políticas de ciencia, tecnología e innovación, para promover el desarrollo económico en estas áreas.

Ayda Fernanda Barona Rodríguez
Correo: abarona@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8487-2727

Ingeniera agrónoma y especialista en Educación Ambiental y Desarrollo de la Comunidad de la Universidad de Cundinamarca y máster en Ciencias Agrarias, con énfasis en suelos y aguas, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Vinculada a AGROSAVIA con su tesis de pregrado en el año 2010 y como profesional desde el año 2013. Cuenta con experiencia en manejo agronómico, nutrición, plagas y enfermedades de importancia económica y evaluación de nuevos materiales de caña para producción de panela.

Javier Jiménez Vargas
Correo: jjimenezv@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2563-7473

Agrónomo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Es tecnólogo en Gestión de Empresas Agropecuarias del SENA. Está vinculado a AGROSAVIA desde 1995. Cuenta con amplia experiencia en el manejo del cultivo de la caña de azúcar para panela y la guayaba y en su agroindustria.

Alfonso Cubillos Varela
Correo: acubillos@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0009-0000-1063-9789

Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería de Control Industrial y doctor en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Tiene experiencia en el diseño y fabricación de equipos para alimentos y poscosecha: productos cárnicos, frutas y almidones. Cuenta con investigaciones en modelación, simulación y control de procesos de secado para productos agrícolas. Tiene experiencia de más de diez años en docencia universitaria en el área de diseño mecánico: simulación por elementos finitos, dinámica de fluidos computacional (CFD) y modelación y simulación de procesos. Ha participado en eventos de divulgación científica, y cuenta con publicaciones científicas y técnicas, así como con dos patentes de invención otorgadas.

Jader Rodríguez Cortina
Correo: jrodriguezc@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5346-092X

Ingeniero agroindustrial de la Universidad del Atlántico, con maestrías en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos y en Gestión y Seguridad Alimentaria, y doctor en Ciencia, Tecnología y Gestión Alimentaria de la Universitat Politècnica de València (UPV), con énfasis en ingeniería de procesos agroalimentarios. Cuenta con experiencia en el desarrollo y análisis de procesos agroalimentarios, con el objetivo de abordar su optimización energética, ambiental y productiva. Tiene experiencia en

simulación y control de procesos agroalimentarios, procesos de secado y calidad de alimentos deshidratados, extracción con fluidos supercríticos, aplicación de ultrasonidos de potencia en procesos agroalimentarios, análisis nutricional y funcional en matrices alimentarias y sus cambios asociados con diferentes etapas del procesamiento industrial. Es investigador PhD sénior del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Jorge Enrique Wong Paz
Correo: jorge.wong@uaslp.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5866-2678

Bioquímico de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México), y maestro y doctor en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Coahuila (México). Cuenta con experiencia en el estudio de compuestos bioactivos de plantas, con énfasis en purificación y bioquímica de procianidinas. En la actualidad estudia el aprovechamiento de residuos agroindustriales, como la pulpa de café y el lichi, para la obtención de bioproductos de valor agregado. También ha trabajado en la solución a problemáticas regionales a través de la transferencia de tecnologías en los temas de estandarización de procesos, conservación de productos y buenas prácticas de manufactura. Hoy en día es profesor investigador de tiempo completo nivel VI de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y pertenece al Sistema Nacional y Estatal de Investigadores en México.

Heriberto Ramírez Cathí
Correo: heriberto.ramirez@tecvalles.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3280-0558

Ingeniero en Agronomía, con especialidad en zootecnia, del Instituto Tecnológico Agropecuario N.° 22 de Ciudad Valles, en San Luis Potosí (México), con maestría en Ciencias, Sistemas Agropecuarios y Medio Ambiente de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (México). Tiene experiencia en la producción de alimentos balanceados para animales de interés pecuario. También ha trabajado en la producción de miel de abeja *Apis*

mellifera y *Apis melipona*, en la cosecha, extracción, envasado y comercialización, así como en todo el proceso de producción de piloncillo granulado. Ha participado en algunos congresos relacionados con productos agropecuarios y de la industria alimentaria, así como en proyectos de investigación relacionados con el aprovechamiento de subproductos de la industria azucarera. Actualmente es profesor de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México, campus Ciudad Valles.

Carlos Felipe González Chavarro
Correo: cfgonzalez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1720-5067

Ingeniero agrónomo y magíster en Fisiología Vegetal, con diplomado en Extensión Rural, de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con experiencia en la red de permanentes y frutales, ejecutando proyectos con énfasis en fisiología de cultivos, fitotecnia, multiplicación de semilla, requerimientos nutricionales, recomendación de nutrición integrada, aplicaciones de microorganismos y caracterización genotípica-fenotípica con marcadores moleculares. Ha trabajado en vinculación tecnológica y evaluación de impacto (balance social) en cultivos como caña de azúcar para panela, palma de aceite, guayaba, marañón, cítricos, mangostino y rambután. Es investigador máster del Centro de Investigación La Libertad de AGROSAVIA.

Nancy del Carmen Barreto-Triana
Correo: nbarreto@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7516-4761

Ingeniera agrónoma de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC); magíster en Ciencias Agrarias, con énfasis en fitoprotección integrada, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y doctora en Ciencias-Entomología, con énfasis en ecología química y comportamiento de insectos, de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), de la Universidad de São Paulo (Brasil). Tiene veintiocho años de experiencia en

el ajuste y la validación de estrategias para el manejo integrado de plagas en diferentes agroecosistemas: pastos de clima frío, papa, caña de azúcar para panela y durazno, y en transferencia de tecnología con productores y asistentes técnicos. Actualmente lidera proyectos de investigación en fitosanidad de la caña de azúcar para panela, con énfasis en manejo de barrenadores del tallo, control biológico por conservación y estudios epidemiológicos de enfermedades. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas y ha participado en otras publicaciones técnicas sobre diferentes temas relacionados con el manejo integrado de plagas. Se desempeña como investigadora PhD asociada en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Gonzalo Alfredo Rodríguez-Borray
Correo: grodriguez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6261-7418

Economista agrario e ingeniero agrónomo, máster en Economía, con experiencia en estudios de agroeconomía y agroindustria, con énfasis en análisis de sistemas de agricultura familiar y de agroindustria rural que involucran la valorización de productos agropecuarios a través de procesos de acondicionamiento y transformación. En alianza con grupos de investigación latinoamericanos y europeos, ha contribuido a desarrollar el concepto y enfoque de "sistemas agroalimentarios localizados", como una estrategia viable para el desarrollo rural, en áreas de economías campesinas de los países de menor desarrollo relativo. Actualmente trabaja en el desarrollo de opciones tecnológicas ecoeficientes de prevención y adaptación para que los pequeños productores agropecuarios puedan enfrentar la variabilidad y el cambio climático; además, en AGROSAVIA trabaja en la estructuración de una estrategia de evaluación de la adopción y análisis de impacto de las tecnologías para el sector agropecuario.

Eduar Yovany Antolinez Sandoval
Correo: eantolinez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0145-6002

Ingeniero agrónomo y magíster en Fisiología Vegetal de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), con experiencia en el estudio de las interacciones genotipo-ambiente en cultivos de interés, la evaluación en campo de genotipos promisorios (alto rendimiento) y su capacidad de adaptación al cambio climático, sistemas agroforestales con cacao, manejo agronómico de cultivos como cacao y caña de azúcar para panela, evaluación de la adopción e impacto de tecnologías y producción de semilla de calidad. Es coinvestigador en el desarrollo de las variedades de cacao TCS 13 y TCS 19. Tiene interés en la investigación de las respuestas de las plantas al estrés biótico y abiótico, en la relación suelo-planta-ambiente, en la adaptación de los cultivos como respuesta al cambio climático y en el área de bioestadística. Actualmente se desempeña como investigador máster de la sede Cimpa de AGROSAVIA.

Diana Beatriz Muñiz Márquez
Correo: diana.marquez@uaslp.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8070-1194

Licenciada en Bioquímica, con énfasis en alimentos, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México), con maestría y doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Coahuila (México). Tiene experiencia en la extracción de fitoquímicos a partir de especias y plantas regionales, utilizando tecnologías alternativas. También ha trabajado en la aplicación de bioprocesos líquidos y sólidos para la producción o extracción de compuestos bioactivos como polifenoles y prebióticos, así como en la formulación de alimentos y bebidas con potencial funcional. Ha participado en diversos congresos relacionados con productos naturales y biotecnología, y en proyectos de investigación enfocados en el aprovechamiento de plantas y residuos agroindustriales para la obtención de compuestos de interés, así como en el uso de jugo de caña y aguamiel como medios de cultivo

alternativos para la producción de prebióticos empleando hongos filamentosos. Actualmente es profesora investigadora de tiempo completo de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca.

Henry Alberto Hernández Martínez
Correo: hahernandez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2323-0242

Estudiante del doctorado, ingeniero en control y magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones. Tiene experiencia en el desarrollo de aplicaciones web y dispositivos móviles, en construcción de bases de datos y en análisis de datos usando técnicas de aprendizaje computacional, *big data* o inteligencia artificial. Actualmente está vinculado a AGROSAVIA como investigador máster, apoyando el diseño y desarrollo de prototipos agroindustriales en proyectos de valorización de la poscosecha de variedades promisorias como la guayaba, ajuste de tecnologías para el manejo de suelos, transporte aéreo de caña y extracción de jugo de caña para la industria panelera, tecnologías para mejorar el producto y la inocuidad del proceso panelero, un estudio piloto de desarrollo de una panela con mayor valor agregado y el desarrollo del proceso agroindustrial de productos derivados de la caña.

Abigail Reyes Munguía
Correo: abigail.reyes@uaslp.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2151-7979

Licenciada en Químico Clínico Biólogo de la Universidad de Montemorelos, con maestría en Ciencias Alimentarias de la Universidad Veracruzana y doctorado en Biotecnología, con énfasis en alimentos, de la Universidad Autónoma Metropolitana (México). Tiene experiencia de más de diez años en la industria de alimentos como gerente de control de calidad y en el desarrollo de productos alimentarios de productos cárnicos, productos derivados de la soya, panificación y leche; además, durante cuatro años fue eslabón de investigación y desarrollo tecnológico del Comité Estatal del Sistema Producto Tilapia del estado de San Luis

Potosí, y ha participado como asesora de desarrollo y estabilidad de productos alimentarios de pequeños productores y empresas de la región. Actualmente es profesora investigadora de tiempo completo de la carrera de Bioquímica en la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México); líder del Cuerpo Académico Consolidado de Bioquímica Aplicada, y coordinadora de la Maestría en Ciencias Bioquímicas. La línea de investigación que trabaja es la obtención de compuestos bioactivos y el desarrollo y estabilidad de nuevos productos (alimentos funcionales).

Yuly Paola Sandoval Cáceres
Correo: ysandoval@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4529-4068

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Cundinamarca y máster en Ciencias Agrarias, con línea de investigación en entomología, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Tiene experiencia en el campo de la investigación agropecuaria, especialmente en el área de entomología, con énfasis en el barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea* spp). Cuenta con experticia en la cría de insectos en laboratorio, y en identificación y curaduría de insectos. Tiene conocimientos en ecología química y sistemas de información geográfica. Actualmente es profesional de apoyo a la investigación en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Yuli Marcela Ordóñez Castañeda
Correo: ymordonezc@unal.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8660-9869

Bacterióloga, magíster en Ciencias con énfasis en microbiología y doctora en Biotecnología. Su trabajo ha estado enfocado en el estudio de la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) asociados a cultivos de interés agronómico. Utilizando técnicas tradicionales y metagenómica, evaluó el impacto de la aplicación de biofertilizantes sobre las comunidades nativas de HFMA asociados a plantas de yuca en la Orinoquía colombiana. Apoyó la caracterización de las accesiones de HFMA en la

Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes de AGROSAVIA. Tiene experiencia en el cultivo *in vitro* de HFMA, sistema que ha utilizado para evaluar la interacción de HFMA con microorganismos solubilizadores de fosfato, como *Pseudomonas* sp., y hongos fitopatógenos, como *Rhizoctonia* sp. Ha participado en transferencia de conocimiento en biología molecular aplicada y en la supervisión de proyectos de I + D + i a nivel nacional.

Carlos Eduardo Ospina Parra
Correo: ceospina@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3155-663X

Ingeniero agrónomo y magíster en Sociedades Rurales de la Universidad de Caldas, con experiencia amplia y certificada en formulación, implementación y gestión de proyectos de I + D + i de carácter nacional, especialmente con comunidades rurales vulnerables. Ha realizado análisis de factores sociales y económicos de los sistemas productivos agropecuarios y de las cadenas de valor, ha liderado procesos de transferencia y vinculación de tecnologías para pequeños y medianos productores agropecuarios y ha desarrollado herramientas para mejorar los servicios de extensión y asistencia técnica. Actualmente es investigador máster de la sede Eje Cafetero de AGROSAVIA.

Francisco Eladio Restrepo Escobar
Correo: ferestrepo@elpoli.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7280-6132

Administrador de empresas de la Universidad de Antioquia, especialista en Gestión del Talento Humano y la Productividad de la Universidad de Medellín, especialista en Alta Gerencia de la Fundación Universitaria María Cano y magíster en Gerencia del Talento Humano de la Universidad de Manizales. Tiene experiencia en gerencia de empresas del sector solidario. Ha participado en proyectos de extensión e investigación relacionados con el fortalecimiento empresarial de productores, la producción y comercialización de bioinsumos, la calidad de vida laboral, las prácticas de gestión humana y las condiciones de trabajo en el

sector agropecuario. Es investigador del grupo de investigación en Sistemas Agrarios Sostenibles (SAS), de la Facultad de Ciencias Agrarias del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (Medellín, Colombia).

Wilmar Alexander Wilches Ortiz
Correo: wwilches@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2905-3347

Ingeniero agrónomo, magíster en Cambio Climático de la Universidad Internacional Iberoamericana de Puerto Rico, magíster en Seguridad Alimentaria con énfasis en desarrollo regional y local de la Universidad Abierta y a Distancia de México y magíster en Biotecnología Alimentaria con énfasis en ingeniería de bioprocesos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia. Tiene experiencia en manejo integrado de plagas y enfermedades en el cultivo de papa, y ha participado en investigaciones sobre fuentes microbiológicas de tolerancia a enfermedades en el cultivo de uchuva; inmovilización de cadmio en cacao y de cadmio y arsénico en arroz, y biofertilización con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en cultivos de caña para panela, cebolla, cacao, tomate, mango, forestales, uchuva, mora y caucho. Actualmente está encargado de la custodia, curaduría y escalamiento de las accesiones de HFMA de la Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes del Banco de Germoplasma de Microorganismos de AGROSAVIA, donde también ejerce como investigador máster en el Centro de Investigación Tibaitatá.

Ximena López González
Correo: xlopez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5260-2025

Ingeniera agrónoma del Instituto Universitario de la Paz. Cuenta con experiencia en programas de asistencia técnica enfocados en el sector panelero y en seguridad alimentaria. Actualmente se desempeña como profesional de transferencia de tecnología de la sede Cimpa, adscrita al Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, donde participa en la vinculación de tecnologías desarrolladas

para los sistemas productivos de guayaba regional, caña de azúcar para producción de panela y ganadería.

Leidy Yibeth Deantonio Florido
Correo: ldeantonio@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8520-1340

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia y magíster en Fisiología Vegetal de la Universidade Federal de Viçosa (Brasil). Es investigadora máster de la sede Cimpa, adscrita al Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Ha participado en y liderado proyectos de investigación y transferencia de tecnología en temas relacionados con agricultura climáticamente inteligente y manejo sostenible e integrado de cultivos; entre estos, se destacan los proyectos que abordaron la zonificación de riesgos agroclimáticos en los sistemas agrícolas de Colombia; la optimización de la producción de semilla seleccionada para caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) destinada a panela y el fortalecimiento de sus organizaciones de productores; el estudio ecofisiológico de los cultivares regionales de guayaba (*Psidium guajava* L.) roja y blanca en interacción con agentes bióticos y abióticos en la Hoya del Río Suárez (Colombia), y, recientemente, la construcción de un sistema de trazabilidad fitosanitaria e inocuidad de la cadena de la guayaba.

Angela María Vargas Berdugo
Correo: avargas@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0671-3055

Microbióloga y máster en Ciencias Agrarias en el área de profundización en fitopatología. Tiene experiencia en diagnóstico de enfermedades y en estandarización de metodologías de deteción causadas por patógenos obligados en cultivos de cítricos, maíz, caña y ornamentales. Trabajó en el Laboratorio Nacional de Diagnóstico Fitosanitario (LNDF) del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), como docente en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y como investigadora de la Universidad Estatal de Míchigan, la Universidad Nacional de

Colombia (sede Bogotá) y la Universidad de los Andes, en investigaciones relacionadas con estudios poblacionales de patógenos de plantas. Actualmente es investigadora máster de la Red de Innovación de Cultivos Transitorios y Agroindustriales del Centro de Investigación Nataima de AGROSAVIA.

Luciano Ramírez
Correo: luramirez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0963-6737

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Caldas. Tiene experiencia en cultivos de importancia económica, como café, cacao, caña y plátano. Ha participado en proyectos en temas relacionados con el manejo integrado de suelos con aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA). Actualmente es profesional de apoyo a la investigación en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Pablo Andrés Osorio Mejía
Correo: posorio@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7672-9285

Licenciado en Biología de la Universidad Pedagógica Nacional; ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y magíster en Ciencias Agrarias, con énfasis en entomología, de la misma universidad. En 2013 se vinculó a AGROSAVIA como profesional de investigación, y desde 2019 es investigador máster en la misma corporación. Tiene experiencia en manejo integrado de insectos plaga, taxonomía, biología y comportamiento, así como en reconocimiento, caracterización y cría de organismos benéficos destinados al control biológico. Se ha desempeñado laboralmente en los agroecosistemas de papa, pastos de clima frío, hortalizas, caña para panela y durazno. Ha publicado documentos acerca de controladores de la polilla guatemalteca de la papa, chinches de los pastos, barrenadores y parasitoides de la caña para panela y la mosca del Mediterráneo en durazno.

Zaida Xiomara Sarmiento Naizaque
Correo: zsarmiento@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0478-0601

Bióloga de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y magíster en Ciencias Agrarias, con énfasis en entomología, de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene experiencia en determinación de parasitoides asociados a los barrenadores del tallo en caña para panela y en la implementación de estrategias para el manejo de *Diatraea* spp. mediante métodos biológicos y etológicos. También ha apoyado el estudio de barrenadores del tallo en cultivos de guayaba, la evaluación de métodos para la prevención y control de la mosca del Mediterráneo (*Ceratitis capitata*) en durazno y el análisis de factibilidad para la implementación de la técnica del insecto estéril de *C. capitata* en Colombia. Ha participado en publicaciones relacionadas con la biología, el daño y el manejo integrado de plagas en los cultivos trabajados. Actualmente es investigadora máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Jhon Mauricio Estupiñán Casallas
Correo: jmestupinan@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8782-7291

Ingeniero agrícola y magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, con experiencia en investigación aplicada a la planificación agrícola basada en análisis agroclimáticos, con énfasis en el manejo del agua en el contexto de la variabilidad y el cambio climático. Tiene habilidades en el manejo de herramientas y en el desarrollo de metodologías enfocadas en la modelación espacial de variables agroclimáticas, modelación hidrológica, determinación de requerimientos hídricos para cultivos, modelación de la distribución potencial de especies y zonificación agrícola. Además, cuenta con experiencia profesional como docente universitario y en el diseño de sistemas de riego y drenaje en el sector privado.

Juan Carlos Martínez Medrano
Correo: jcmartinezm@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0506-3660

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira; magíster en Estudios de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación de la Universidad de Salamanca (España), y PhD de la misma universidad. Durante diez años trabajó en proyectos de desarrollo en el ámbito de la cooperación internacional, en países de Centroamérica, el Caribe y el norte de África. Desde 2013 trabaja en AGROSAVIA, en el Departamento de Transferencia de Tecnología, donde ha liderado diversos proyectos sobre la adaptación de la agricultura al cambio climático. En la actualidad dirige el grupo de investigación Cambios Sociotécnicos para el Desarrollo de la Innovación en el Sector Agropecuario, en el que se enfoca principalmente en la comprensión de las dinámicas asociadas a la gestión del conocimiento y los procesos de cambio técnico relacionados con la innovación bajo un enfoque geográfico. También forma parte del Sistema de Información Agroclimática para el Cultivo de Papa.

Liliana del Pilar Castro Molano
Correo: licasmol@saber.uis.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8893-6310

Doctora en Ingeniería Química. Es integrante del grupo de investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética (Interfase) y profesora de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia. Ha trabajado durante más de doce años en procesos anaeróbicos, específicamente en el área de codigestión, diseño y monitoreo de digestores tubulares rurales a gran escala, caracterización y postratamientos de digeridos y potencial energético de la tecnología. Actualmente hace parte del Concejo Directivo de la RedBioLAC en Colombia.

Humberto Escalante Hernández
Correo: escala@uis.edu.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6257-8110

Magíster en Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y PhD en Ingeniería Química de la Universidad de Cantabria (España). Es profesor titular de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS. Es investigador sénior del Minciencias y miembro de los grupos de investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética (Interfase) y Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (Ceiam), de la UIS. Su carrera se ha desarrollado en la línea de investigación para la gestión y valorización de residuos agroindustriales mediante la tecnología de digestión anaeróbica.

Sonia Mercedes Polo-Murcia
Correo: spolo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9362-4717

Ingeniera química de la Universidad de América y máster en Economía de la Universidad de los Andes. Es investigadora en economía ambiental para apoyar el desarrollo sostenible y la gestión de los recursos naturales para la agricultura. Tiene interés en la economía y la valoración de los recursos hídricos para la producción agrícola. Cuenta con experiencia en modelación de cultivos en escenarios de variabilidad y cambio climático, análisis de ciclo de vida y captura de carbono, análisis y modelado microeconómico de tecnologías agrícolas, eficiencia técnica, costos de producción, análisis de precios y estudios de cadena de valor de la agroindustria panelera. En la actualidad trabaja en modelamiento espacial de cultivos e implementación de procesos de optimización agroeconómica en áreas de interés regional, con inclusión de modelos hidroeconómicos. Es integrante de dos grupos de investigación reconocidos por el Minciencias: Ecología y Agricultura Inteligente para la Sostenibilidad y Competitividad de los Sistemas de Producción en el Trópico (categoría A), e Innovación Tecnológica de Procesos Agroindustriales para el Desarrollo Rural (categoría A1). Es investigadora máster de AGROSAVIA.

Ginna Natalia Cruz-Castiblanco
Correo: gcruz@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2355-4914

Ingeniera agrónoma y magíster en Estadística Aplicada de la Universidad Santo Tomas. Su línea de investigación se encuentra enfocada en la aplicación de modelos de predicción de rendimiento, modelos de crecimiento en frutos, caracterización y tipificación de sistemas productivos, análisis para evaluar el efecto de los pesticidas en las abejas melíferas e interacción de plagas y enfermedades respecto a los factores bióticos y abióticos que favorecen su prevalencia. Durante su trayectoria ha diseñado y validado métodos de control de plagas y enfermedades en diferentes sistemas productivos. Actualmente se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA.

Andrea Onelia Rodríguez Roa
Correo: arodriguezr@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9279-3607

Licenciada en Física, magíster en Ciencias-Meteorología y especialista en Geomática. Sus áreas de investigación pertenecen al campo de las ciencias de la tierra, específicamente a la climatología y agroclimatología, con más de diez años de experiencia. Su principal interés está en el entendimiento de las causas y los impactos de la variabilidad y el cambio climático. Ha trabajado en evaluación de modelos climáticos globales, generación de escenarios de cambio climático, construcción de sistemas expertos y alertas tempranas, modelación espacial de plagas y enfermedades, análisis de riesgo agroclimático y zonificaciones. Igualmente, ha participado en proyectos de investigación de agricultura protegida. Tiene alta capacidad en el manejo, procesamiento y análisis de información climática y agroclimática. Es investigadora máster del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Viviana Marcela Varón-Ramírez
Correo: vvaron@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4479-5795

Ingeniera agrícola y magíster en Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia. Su ejercicio profesional se ha basado en el análisis espacial de propiedades y procesos del suelo. Ha implementado metodologías de mapeo tradicionales, a través de la elaboración de modelos evolutivos de suelos, y digitales, a través del análisis geoestadístico y el uso de algoritmos de aprendizaje asistido por computadora. Actualmente se encuentra realizando sus estudios de doctorado en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Fabián Andrés Velásquez Ayala
Correo: favelasquez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1535-3549

Ingeniero agroindustrial de la Universidad del Tolima. Actualmente está vinculado a AGROSAVIA, en el Centro de Investigación Tibaitatá, donde ha desarrollado proyectos de investigación en el área de ingeniería de procesos. Tiene experiencia de siete años en investigaciones relacionadas con modelación matemática y simulación de procesos, combustión de biomasa, manejo de energía y manejo poscosecha de alimentos. De igual manera, ha participado en proyectos que incluyen el diseño y evaluación de equipos para módulos de producción de azúcar no centrifugada de caña. Es profesional de apoyo a la investigación adscrito a la Red de Innovación de Cultivos Transitorios y Agroindustriales de AGROSAVIA.

Paula Helena Reyes Herrera
Correo: phreyes@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0502-4266

Ingeniera electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, con maestría en Ingeniería Electrónica y con doctorado en Ingeniería de Sistemas en Bioinformática del Politecnico di Torino (Italia).

Tiene un profundo interés en ciencias de la vida. Ha trabajado en el desarrollo de herramientas computacionales para predecir asociaciones en datos genómicos. Ha trabajado en algoritmos de regulación génica postranscripcional, genotipado y detección de variantes y asociación de genotipo y fenotipo para tetraploides. Desde que se unió a AGROSAVIA, ha estado trabajando en el Banco de Germoplasma Vegetal colombiano, en el sistema de información y en una plataforma de genotipificación del banco. Aunque sus principales intereses están en bioinformática aplicada a la agrigenómica y al estudio de la diversidad colombiana, también le interesa la integración de las tecnologías de la información (incluyendo la inteligencia artificial) en el sector agrícola colombiano.

Bellanid Huertas-Carranza
Correo: bhuertas@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1034-4072

Administradora ambiental, magíster en Estudios y Gestión del Desarrollo y estudiante doctoral en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad, con amplia experiencia en proyectos de investigación, transferencia, asistencia técnica, ordenamiento social de la propiedad, gestión de información y gestión de conocimiento en el sector agropecuario y su planificación rural. Desarrolla temas relacionados con el sistema productivo de caña panelera, referentes a la visibilización de la importancia que presta la agricultura de conservación y sus productores a través del manejo adecuado de los sistemas agrícolas; la determinación y evaluación de servicios ecosistémicos de provisión, soporte y regulación en diferentes unidades del paisaje agrícola del país, y la evaluación de herramientas para la adaptación y mitigación del cambio climático.

John Javier Espitia González
Correo: jjespitia@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2684-655X

Ingeniero mecánico y máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética, con experiencia en diseño, tecnificación y mantenimiento de plantas de producción, así como en

desarrollo de maquinaria agrícola, industrial y agroindustrial. Actualmente es profesional de apoyo a la investigación adscrito a la Red de Innovación de Cacao de AGROSAVIA, desarrollando proyectos de investigación en el área de ingeniería de procesos.

Luis Alberto Olvera Vargas
Correo: lolvera@ciatej.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8771-6575

Licenciado en Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, con maestría y doctorado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México). Tiene experiencia en sistemas de información geográfica, análisis espacial, teledetección, ordenamiento territorial, agricultura de precisión, modelado biológico y cartografía participativa. Ha participado en el desarrollo y ejecución del primer Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria del Senasica, México. Actualmente es investigador por México (Cátedra Conacyt) asignado al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.

Andrew Roberts Cummings
Correo: andrewrobertscummings@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3445-4636

Magíster en Planificación Internacional de Tecnología y PhD en Planificación y Desarrollo de la Universidad de Aalborg (Dinamarca). Es investigador, antropólogo sociocultural de formación inicial y crítico del "desarrollo" como fenómeno complejo y problemático. Tiene amplia experiencia académica abordando problemáticas del desarrollo territorial: capacidades estatales para la transformación productiva y el desarrollo económico territorial; planificación del desarrollo territorial, y configuración y caracterización de territorios urbano-rurales. Investiga la emergencia de capacidades de innovación en empresas de la economía social, iniciativas de la pequeña agroindustria rural y la emergencia de sistemas territoriales de innovación en cuanto a las dinámicas del desarrollo económico territorial. Es miembro activo de redes

académicas internacionales y revisor para revistas académicas especializadas. Diseña y realiza investigaciones aplicadas para evaluar programas de desarrollo; para analizar el potencial de desarrollo de iniciativas económicas territoriales y dinámicas de mercado laboral relacionadas con el empleo juvenil para evaluar factibilidad, y para diseñar programas y analizar operaciones de empresas internacionales grandes en relación con las dinámicas de sus cadenas de valor, los territorios de localización y el bienestar de las personas. Tiene extensa experiencia como practicante y agente facilitador de procesos de desarrollo territorial.

Prólogo

Conservo un dulce recuerdo de cuando vivía fuera del país y, por casualidad, encontré panela en un supermercado de productos latinos, en una presentación y nombre común de México: piloncillo. Esto me llenó de mucha nostalgia, y aunque no era comprador de panela cuando vivía en Colombia, lejos de mi país, y después de este hallazgo, me volví consumidor habitual para la preparación de la limonada que nunca faltó en nuestra casa y con la que sorprendía a las visitas en múltiples reuniones sociales. Lo más grato de todo fue ver que, a pesar de estar la panela orientada al mercado mexicano, su origen era colombiano, de excelente calidad y a un precio muy asequible. Recuerdo que era común en el supermercado que las personas que registraban los productos para su pago se sorprendieran y me preguntaran de qué se trataba ese producto. La panela se convirtió en un alimento esencial de la dieta de mi familia. Debo reconocer que la nostalgia me embargaba cada vez que refrescaba los calurosos veranos con limonada o calentaba los fríos inviernos con agua de panela caliente de la tierrita.

La panela se ha caracterizado por surgir de una agroindustria rural alentada por pequeños productores, con bajos niveles de tecnificación para el cultivo y transformación de la caña de azúcar, y constituida en países en vías de desarrollo. Sin embargo, dicha agroindustria tiene la responsabilidad de atender de manera constante la demanda de la población, que en gran parte es vecina de los llamados "trapiches paneleros" y en otros casos hace parte de la comunidad latinoamericana que vive en otras ciudades o incluso en el exterior. Debido a la importancia social y económica

de las actividades que rodean la producción de panela, es pertinente contribuir al cierre de brechas tecnológicas, para garantizar el éxito y la permanencia de la agroindustria panelera en un entorno cada vez más complejo y competitivo.

La historia personal compartida sobre el redescubrimiento de la panela como parte de la vida cotidiana en un entorno lejano evoca la poderosa conexión emocional que esta tradicional y humilde fuente de dulzura puede despertar. Este relato refleja no solo la universalidad de su atractivo, sino también su arraigada presencia en la cultura y la identidad colombiana. Más allá de las fronteras, la panela ha trascendido como un vínculo tangible con la tierra y las tradiciones, sirviendo como un recordatorio dulce de hogar para muchos. En este contexto, el impulso hacia una mayor tecnificación y desarrollo de la agroindustria panelera se convierte en una tarea esencial, no solo para satisfacer la demanda local y global, sino también para preservar y enriquecer esta parte fundamental de la herencia cultural latinoamericana.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a los editores de este libro, a sus dedicados autores y a todos aquellos que contribuyeron en el proceso editorial. Asimismo, extiendo mi reconocimiento a las directivas de AGROSAVIA, cuyo apoyo y compromiso hicieron posible la realización de esta obra. Espero que este libro sea de gran utilidad para que sigamos contando dulces historias de la panela.

Juan Diego Palacio Mejía

Introducción

La panela, también conocida como chancaca, rapadura, piloncillo, entre otros, es un edulcorante y alimento arraigado a las costumbres culturales en varios países, que se destaca por su proceso de producción artesanal y de bajo nivel tecnológico, tradicionalmente llevado a cabo por pequeños productores en zonas rurales. El proceso implica la extracción y evaporación del jugo de la caña de azúcar para obtener el producto final. Sin embargo, esta tradición ha limitado su potencial de desarrollo y modernización en la industria alimentaria. A pesar de su popularidad y demanda en muchos mercados, la falta de tecnificación en todo el proceso, desde la adquisición de la materia prima hasta la transformación de la caña en panela, ha resultado en una calidad variable del producto final y en una menor eficiencia en términos de rendimiento y costos de producción. Para lograr un avance significativo en la agroindustria panelera, es necesario implementar mejoras en los procesos de producción, promover la adopción de tecnologías modernas y desarrollar estrategias de comercialización que agreguen valor al producto final. De esta manera, la panela podría posicionarse como un producto de alta calidad y competitividad en el mercado nacional e internacional. En este sentido, se ha preparado la presente obra titulada *Avances de investigación para la agroindustria panelera*. Este libro se plantea como una herramienta destinada a fomentar el desarrollo y la innovación en el sector, así como a inspirar acciones concretas que impulsen el avance y la consolidación de la agroindustria panelera.

El propósito fundamental de este libro es recopilar, por primera vez y en una obra integral, los resultados más destacados de la investigación en diversas áreas del conocimiento con el fin de fortalecer la agroindustria panelera. Este proyecto editorial no solo engloba los trabajos desarrollados por AGROSAVIA, sino también por otras entidades pertenecientes al SNCT (Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación) de Colombia, así como por redes de conocimiento internacionales. Estos aportes constituyen una valiosa fuente de referencia para el sector de la agroindustria de la panela en Latinoamérica. Asimismo, esta iniciativa promueve la colaboración entre distintas instituciones, facilitando la difu-sión de sus avances técnicos y tecnológicos alrededor de la agro-industria panelera. Gran parte de los resultados incluidos en este libro son fruto del trabajo realizado en la sede Cimpa del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, ubicada en el municipio de Barbosa, Santander (Colombia). Desde 1986, esta sede ha sido un epicentro de investigaciones dedicadas al desarrollo de la agroindustria panelera. No obstante, para la elaboración de esta obra, se extendió la invitación a otros investigadores tanto nacionales como internacionales que han contribuido de manera significativa al campo de la agroindustria panelera. De esta manera se consolidaron los avances más recientes y se estableció una base sólida para la continuidad y el futuro direccionamiento de la investigación.

Mediante este libro, AGROSAVIA proporciona información procesada y analizada a la agroindustria panelera, específicamente a aquellos actores involucrados en investigación, desarrollo e innovación, y a los responsables de la toma de decisiones. Se presentan resultados significativos de investigación que tienen el potencial de contribuir a la actualización y apropiación del conocimiento, así como a la promoción del uso de tecnologías desarrolladas tanto por AGROSAVIA como por otras instituciones. El libro está organizado en tres grandes componentes: 1) cultivo y manejo agronómico; 2) transformación, industrialización y diversificación de uso de la panela, y 3) análisis socioeconómico y ambiental de la agroindustria

panelera. Cada componente contiene capítulos con una estructura similar a un artículo científico (resumen, introducción, metodología, resultados y discusión, conclusiones y referencias bibliográficas). La obra ofrece valiosos insumos para la agroindustria panelera al proporcionar información fiable, rigurosa y de calidad. Este libro es una muestra del compromiso de AGROSAVIA con la excelencia y la colaboración, y estamos seguros de que será una herramienta invaluable para aquellos dedicados al desarrollo y la innovación en la agroindustria panelera.

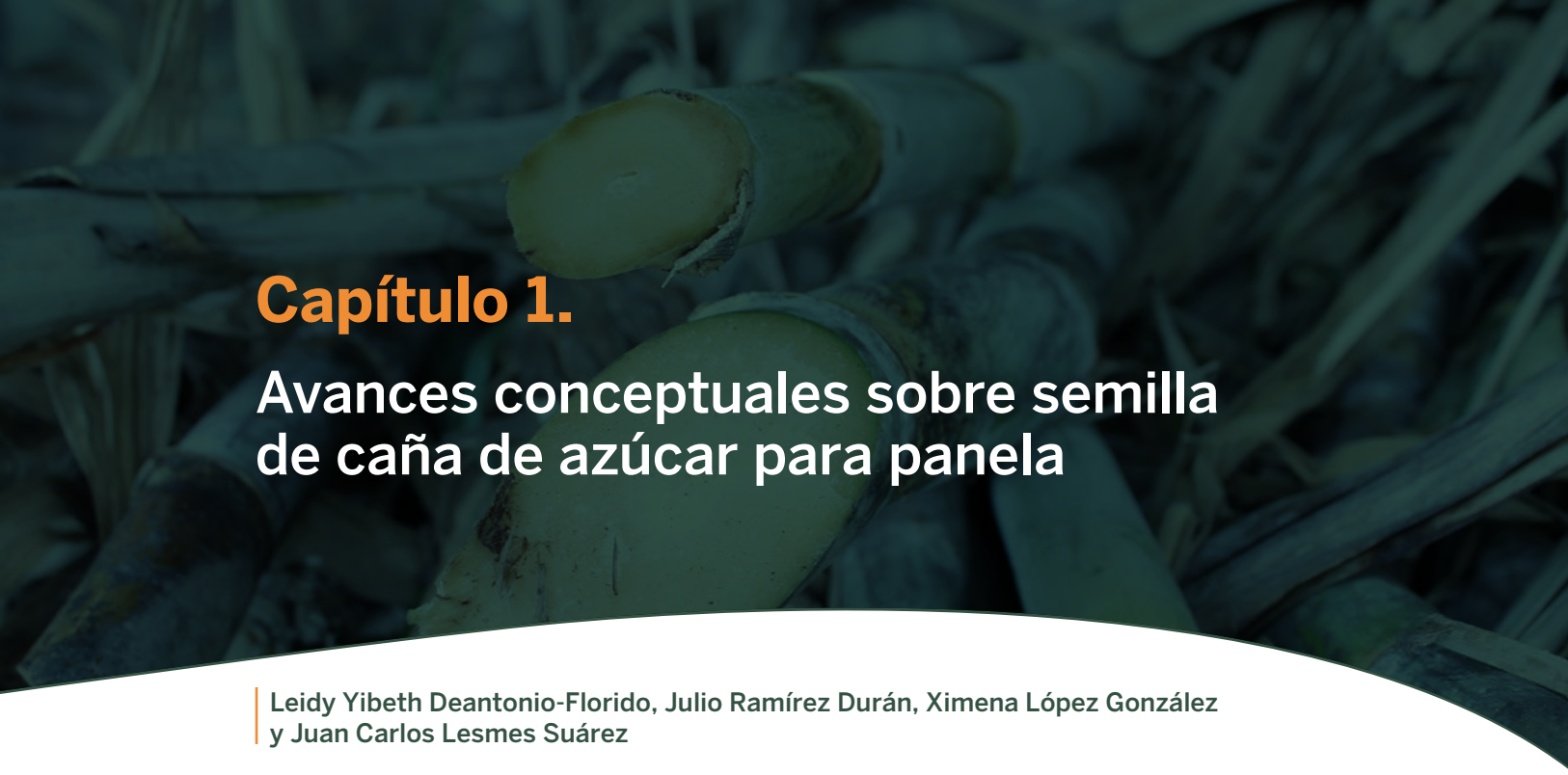




Componente I

Manejo agronómico, corte y transporte de la caña de azúcar para panela





Capítulo 1.

Avances conceptuales sobre semilla de caña de azúcar para panela

Leidy Yibeth Deantonio-Florido, Julio Ramírez Durán, Ximena López González y Juan Carlos Lesmes Suárez

Resumen

En Colombia, la obtención de semilla seleccionada y el establecimiento de semilleros de caña de azúcar para panela son retos que apuntan a mejorar e incrementar la productividad y la sostenibilidad de los cultivos. El objetivo del capítulo es presentar los principales avances conceptuales sobre la producción de semilla seleccionada que asegura la calidad de la caña de azúcar para panela. Se recopilaron y analizaron datos primarios registrados en la producción de semilla seleccionada y en semilleros de las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510, con lo cual se establecieron indicadores de calidad orientados al cumplimiento de la normatividad existente. Se conceptualizó un modelo de producción de semilla de calidad integrando el conocimiento de los productores de caña e información técnica sobre aspectos genéticos, físicos, sanitarios y fisiológicos. Este aporte técnico proporciona información de referencia para mejorar la toma de decisiones frente a la producción y uso de semilla seleccionada de caña para panela en Colombia.

Palabras clave: *Saccharum* spp. L., semilla seleccionada, modelo productivo, semilleros

Introducción

Los métodos de propagación de la caña de azúcar varían en función de las necesidades productivas y los avances tecnológicos, aunque en los países tradicionalmente cañicultores de Centro y Suramérica predominan los métodos asexuales (Digonzelli et al., 2019; Jiménez, 1995; May & Ramos, 2019; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Programa para Incrementar la Competitividad del Sector Azucarero [Proicsa], 2019; Tarazona Parra, 2011), y en India predominan el método de trasplante espaciado, la técnica de bolsa de plástico, la técnica de chip de yemas o brotes (Jain et al., 2010; Srivastava & Kumar, 2020), entre otros. Aun cuando se registran importantes avances en la producción *in vitro* de semilla (micropropagación: cultivo de ápices meristemáticos o meristemas, o uso de sistemas de inmersión temporal automatizados) (Jiménez, 1995; Lorenzo et al., 1998), con fines tanto de mejoramiento genético como de multiplicación masiva de material de siembra sano (Srivastava & Kumar, 2020), la agroindustria panelera colombiana se abastece de semilla obtenida principalmente en campo a partir de esquejes, yemas embolsadas y cogollos (Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015).

En Colombia, AGROSAVIA soporta la investigación y la transferencia tecnológica sobre el uso y manejo de material de siembra de calidad en los sistemas productivos de caña de azúcar (*Saccharum* spp. L.) para panela. Aunado a lo anterior, es importante señalar que la producción de semilla seleccionada es uno de los ejes de la modernización de los cultivos, factor que a su vez favorecerá la reconversión y formalización de los trapiches en Colombia (Congreso de Colombia, 2019), dado que la cantidad y calidad de la caña influye en la capacidad planeada o ajustada de las unidades productoras de panela. A mediano y largo plazo, el mejoramiento y manejo integral de los cultivos de caña podría generar un impacto positivo en el aumento de áreas renovadas, la sostenibilidad y el aumento en la producción de caña y panela. Con estas consideraciones, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) brinda los lineamientos que aseguran estándares mínimos

de calidad de la semilla para garantizar, entre otros aspectos, una adecuada propagación del material vegetal (resoluciones 1696 de 1984 y 3168 de 2015 del ICA).

Se debe tener en cuenta que la caña de azúcar es una especie semipermanente y que en Colombia su manejo, las condiciones agroecológicas y el nivel tecnológico son heterogéneos, especialmente a causa de los contrastes socioeconómicos del país (Álvarez & Farías, 2012; Rodríguez Borray et al., 2020), los cuales influyen directamente en la baja renovación de los cultivos y la poca implementación de nuevas tecnologías. A esto se suma que buena parte de los cultivos de caña de azúcar destinados a la elaboración de panela se han establecido con variedades tradicionales (POJ 2878, RD 75-11, CP 57-603, CC 84-75, CC 86-45, entre otras) (Ramírez Durán, Insuasty Burbano & Murcia Pardo, 2014), introducidas a las diferentes regiones hace más de 30 años y propagadas con esquejes, que es el método más utilizado a nivel nacional (Manrique Estupiñán, 2011; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Osorio, 2007; Rodríguez Borray et al., 2020). Además, a lo largo del territorio nacional se presentan esquemas de manejo sanitario y una selección del material vegetal tradicionales y frágiles, que dificultan la detección temprana de plagas y enfermedades, lo que limita la producción.

Asimismo, se presentan otros factores que podrían agravar la problemática relacionada con la producción de semilla:

- El traslado o transporte de material de siembra entre regiones (Tarazona Parra, 2011): esta práctica, sin los cuidados requeridos, favorece la diseminación de plagas como la hormiga loca (*Nylanderia fulva*), el salivazo (*Aeneolamia varia*) y el barrenador de la caña (*Diatraea* spp.) (Ramírez Durán et al., 2019; Tarazona Parra, 2011), y de enfermedades bacterianas como la escaldadura de la hoja (LSD), causada por *Xanthomonas albilineans*, y el raquitismo de la soca (RSD), causado por *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* (Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Ramírez Durán et al., 2019; Victoria & Calderón, 1995).

- El poco usual establecimiento de semilleros en regiones paneleras: esto impide la ampliación de áreas a partir de material vegetal producido exclusivamente para este propósito. La recomendación general indica que los semilleros podrían ocupar el 10 % del área sembrada de las unidades productivas de caña (Ramírez Durán et al., 2019). La baja disponibilidad de semilla de calidad, aunada a ciertas prácticas culturales de los productores, dificulta la adopción o implementación de semilleros, lo que genera una lenta o inexistente renovación de los cultivos comerciales y una baja adopción o uso de nuevas variedades o cultivares con mejores características productivas y agroindustriales, como las variedades Cenicaña Colombia, CC 93-7711, CC 93-7510 (Barona-Rodríguez et al., 2020; Ramírez Durán, Insuasty Burbano & Murcia Pardo, 2014; Ramírez Durán, Insuasty Burbano & Viveros Valens, 2014) y CC 01-1940 (Barona Rodríguez et al., 2021).
- Los esquemas tradicionales de producción de semilla a partir de caña obtenida durante la cosecha: estos esquemas, que son usados entre regiones sin ningún tipo de control, afectan el prendimiento y el aseguramiento de aspectos sanitarios y genéticos.

Es a partir de las limitaciones ya expuestas que la obtención de semilla cuenta con una serie de criterios mínimos de calidad que podrían asegurar hasta el 40 % de los rendimientos del cultivo y, con ello, superar las limitaciones en la calidad de la semilla, para contribuir a la reducción de los costos de producción y de los impactos ambientales negativos producto de la aplicación descontrolada de productos de síntesis química, a la vez que se favorece la sostenibilidad y competitividad del subsector panelero colombiano. En la actualidad, la Ley 2005 de 2019 (Congreso de Colombia, 2019) promueve, entre otras líneas estratégicas, la modernización de cultivos y trapiches, lo cual es posible mediante la implementación de prácticas como la renovación y ampliación de áreas productivas con semilla seleccionada; este cambio tecnológico podría proyectar el aumento de los rendimientos del subsector panelero y acercar su promedio nacional a valores de

referencia obtenidos de manera experimental (entre 180 y 270 toneladas de caña por hectárea [TCH], y entre 21,5 y 30,8 toneladas de panela por hectárea [TPH]) (Ramírez Durán, Insuasty Burbano & Murcia Pardo, 2014).

En los últimos años, AGROSAVIA ha promovido y fundamentado la producción de semilla seleccionada de caña de azúcar para panela a través de la investigación y transferencia de tecnología (tabla 1.1), generando conocimiento y lineamientos técnicos en torno a un modelo productivo que incluye criterios de calidad basados en los conceptos de semilla, así:

- Semilla: "óvulo fecundado y maduro o cualquier otra parte vegetativa de la planta de un cultivar obtenido por el mejoramiento genético como consecuencia de la aplicación de conocimientos científicos que se use para la siembra y/o propagación" (ICA, 2015).
- "Semilla de caña de azúcar" es un término adecuado, puesto que representa e indica el uso de trozos de tallo, estacas o esquejes provenientes de una planta de longitud variable con una o varias yemas (ICA, 1984).
- "Semilla de calidad" hace referencia al conjunto de atributos que involucran y garantizan la expresión genética de los cultivares de caña, la integridad física, el comportamiento fisiológico, la capacidad de adaptación y la baja o nula presencia de plagas y enfermedades que afecten su sanidad o los cultivos que se establezcan con este material vegetal. La pureza varietal y la sanidad son parte de los criterios mínimos cuando se habla de semilla de calidad.
- Semilla seleccionada: alcanza esta distinción durante su producción, puesto que existe verificación de los factores de calidad según la Resolución 3168 de 2015 del ICA.

Tabla 1.1 Periodo y contribución de AGROSAVIA para consolidar las bases conceptuales y prácticas de la producción de semilla de calidad

Periodo	Contribución
2013-2018	Proyecto "Conformación de núcleos productores de semilla de caña a partir de plantas obtenidas mediante la extracción de yemas y establecimiento de semilleros comerciales en los departamentos de Santander, Boyacá y otras regiones que demandan la tecnología".
2013-actualidad	Establecimiento y ajuste del sistema de producción de plantas germinadas de AGROSAVIA para el subsector panelero de Colombia (Deantonio-Florido et al., 2021; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Murcia-Pardo & Ramírez-Durán, 2017; Ramírez Durán et al., 2019).
2018-2019	Proyecto "Bolsa de semillas para la paz", el cual incentivó la sustitución de cultivos de uso ilícito en los departamentos de Norte de Santander, Putumayo y Antioquia.
2020-2024	Proyecto "Fortalecimiento de sistemas locales de producción de semilla del cultivo de caña de azúcar para panela en los departamentos de Santander, Antioquia, Cauca, Cundinamarca, Tolima, Caquetá y otras regiones que demandan la tecnología".

Fuente: Elaboración propia

En línea con la aplicación de los conceptos relacionados con la semilla, AGROSAVIA adaptó y ajustó la tecnología de producción de plantas germinadas provenientes de yemas individuales bajo la orientación de Cenicaña (Viveros et al., 1997), y se cuenta con un modelo de producción en la Hoya del Río Suárez, que comprende una de las regiones más representativas de la producción de panela en el país. Sumado a esto, la articulación y alineación institucional con el ICA, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Cenicaña y la Federación Nacional de Productores de Panela (Fedepanela) ha sido fundamental para avanzar en el tema.

En este contexto, se presentan aquí los principales avances conceptuales sobre la producción de semilla seleccionada, que asegura la calidad de la caña de azúcar para panela; así pues, se brinda información de referencia para la toma de decisiones sobre

la obtención de semilla seleccionada y el establecimiento de semilleros. Los aspectos conceptuales y prácticos que integran este capítulo se validaron para las variedades comerciales CC 93-7711 y CC 93-7510, pero tienen aplicabilidad en otras nuevas.

Metodología

La documentación de este capítulo se basa en información primaria obtenida en las condiciones agroecológicas de la región panelera de la Hoya del Río Suárez en el periodo 2013-2018, en el cual se introdujeron los conceptos de calidad en la producción de semilla seleccionada de los cultivares comerciales CC 93-7711 y CC 93-7510, con base, principalmente, en la tecnología de producción de plantas germinadas. Asimismo, en la sede Cimpa, del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, se establecieron semilleros con el propósito de identificar los indicadores de calidad que permitieran referenciar las recomendaciones o características más favorables para la obtención de semilla asexual seleccionada y su establecimiento en nuevos semilleros o cultivos comerciales.

Resultados

Semilla seleccionada

La caña de azúcar se propaga principalmente por métodos asexuales; a continuación, se describen las técnicas más empleadas en el subsector panelero:

- Producción de esquejes, estacas o trozos de tallos: se emplean trozos de caña de entre 30 y 60 cm (figura 1.1), que cuenten con tres o cuatro yemas viables (López Lopera, 2014; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015); usualmente se obtienen durante la cosecha, es decir, entre 16 y 20 meses después del inicio del ciclo. El control sanitario es limitado y poco estricto.



Figura 1.1. Esquema general de propagación de esquejes de caña de azúcar para panela. a. Corte de los tallos de caña en cultivos comerciales con edades de 16 a 24 meses, dependiendo de la variedad y las condiciones agroecológicas, o de semilleros de máximo 10 meses; b. Trozos de tallos o cangres de caña deshojados; c. Esquejes o tallos de caña seleccionados con 3-4 yemas viables para la siembra en sitio definitivo.

Fotos: Juan Carlos Lesmes Suárez

- Cogollo: se emplean las yemas del ápice del tallo (figura 1.2). Su obtención se realiza 17 meses después del corte o siembra; sin embargo, se recomienda tener en cuenta el tiempo de maduración del cultivar seleccionado (López Lopera, 2014; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015) para garantizar la viabilidad de las yemas.

- Yemas embolsadas: consiste en la extracción o corte de pequeños trozos del tallo que presentan yemas viables. Estos trozos de caña se siembran en germinadores o en bolsas plásticas de 3 kg, hasta alcanzar la germinación y un adecuado desarrollo radicular, para ser ubicadas en el sitio definitivo (figura 1.3); el porcentaje de prendimiento en campo puede oscilar entre el 90 % y el 97 %, pero dependerá del manejo agronómico (Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Osorio, 2007). Esta forma de propagación se emplea principalmente para las resiembras o en el establecimiento de nuevas parcelas en trabajos de estudio de variedades.



Figura 1.2. Esquema general de propagación de cogollo de caña de azúcar para panela. a. Caña en pie con edad de corte; b. Cogollo o sección apical del tallo de caña; c. Nudo con yema viable.

Fotos: Juan Carlos Lesmes Suárez

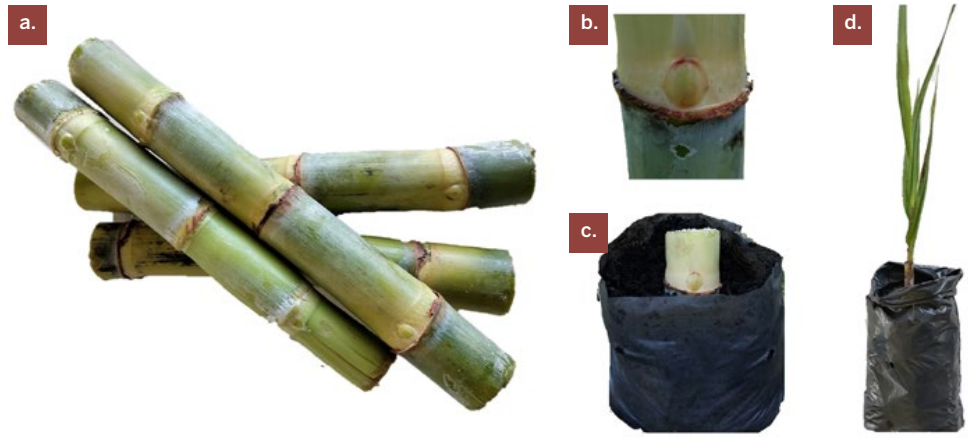


Figura 1.3. Esquema general de propagación de yemas embolsadas de caña de azúcar para panela. a. Tallos de caña seleccionados para cortar los nudos con yemas viables; b. Detalle del corte de la yema; c. Yema ubicada en bolsa negra con tierra para su germinación y prendimiento; d. Planta desarrollada como resultado de embolsar las yemas de caña.

Fotos: Juan Carlos Lesmes Suárez

- Plantas germinadas: semillas seleccionadas a partir de la extracción de yemas individuales, lo que permite asegurar una alta calidad genética y sanitaria de los semilleros básicos o semicomerciales durante dos o tres ciclos productivos (figura 1.4).



Figura 1.4. Esquema general e infraestructura instalada en AGROSAVIA para producir plantas germinadas de caña de azúcar para panela.

Fuente: Deantonio Florido y López González (2020)

La elección del método de propagación dependerá del origen de la semilla (semillero o cultivo comercial) y del uso o tipo de parcela que se establecerá (semilleros, resiembras, siembra de nuevas variedades promisorias o para investigación). De acuerdo con Murcia Pardo y Ramírez Durán (2015) y Ramírez Durán et al. (2019), las principales recomendaciones en la obtención de semilla de caña de azúcar para panela son:

- La variedad o cultivar comercial que se propague debe estar registrado ante el ICA y contar con la información de referencia sobre su evaluación agronómica y su estudio de adaptación agroecológica.

- Garantizar la pureza varietal de la semilla, teniendo como fuente semilleros o cultivos comerciales sin mezcla de variedades.
- La edad del semillero para corte no debe superar los diez meses.
- El número máximo de cortes de un semillero es tres, ya que después de este tiempo se presenta un deterioro en la calidad genética y sanitaria de la semilla.
- Elegir semilleros comerciales que cuenten con registro ICA vigente para este fin, en los cuales se garantice la implementación de prácticas de manejo integrado de plagas y enfermedades, un programa de fertilización que parta de los resultados del análisis de suelos y un control oportuno de arvenses.
- Realizar la fumigación y desinfección del material vegetal procedente del huerto básico o semillero de multiplicación, preferiblemente en la parcela cosechada, a través de la inmersión de la semilla en una solución de fungicida e insecticida, preferiblemente con ingredientes activos que cuenten con registro ICA vigente (por ejemplo, carboxín + captan: 3 g/L de agua).
- Desinfectar la herramienta de corte con una solución de yodo al 2 % o de formol al 5 %, antes, durante y después de cada actividad; se incluyen machetes, la máquina extractora de yemas, entre otras herramientas.
- Realizar pruebas de tejido vegetal para detectar la presencia de raquitismo de la soca (*L. xyli* subsp. *xyli*) y escaldadura de la hoja (*X. albilineans*) (Ramírez Durán et al., 2019; Ramírez Durán & Murcia Pardo, 2014) entre los siete y nueve meses de edad de la caña (Cenicaña, 2023). En caso de obtener una respuesta positiva a la presencia de estos patógenos, con una incidencia inferior al 5 %, se sugiere realizar el tratamiento térmico de las yemas según los protocolos para el control de estas limitantes bacterianas (Ramírez Durán et al., 2019); por su parte, si la incidencia es superior al 5 %, se recomienda evitar su uso como material de multiplicación.

Calidad de las plantas germinadas

El **indicador de calidad genética** se determina a partir de la trazabilidad (registro) del origen y manejo de la semilla. Como lo indican Ramírez Durán et al. (2019), la elaboración de libros de campo y el uso de formatos para este fin pueden facilitar la identificación y registro de los cultivares que serán empleados en los semilleros y producción de semilla. Otro mecanismo consiste en usar etiquetas durante la comercialización de la semilla seleccionada, según la información solicitada en la Resolución 3168 de 2015 del ICA (figura 1.5).

Las principales variables que identifican la **calidad física y fisiológica de la semilla seleccionada** de caña para panela son la edad de la caña en el momento del corte y el porcentaje de germinación de yemas, y otras variables alométricas, como la altura de las plantas (ALPLA), el diámetro del tallo (DIATA) y un cespedón bien formado (sistema radicular). Además de estas variables, en la producción de plantas germinadas se registran los porcentajes de plantas trasplantadas y obtenidas para la siembra en sitio definitivo. La respuesta de los cultivares y de la semilla a estas variables de calidad también depende de diversos factores como el fenotipo del cultivar, la interacción ambiental, el manejo agronómico, las condiciones de cosecha de los semilleros y la selección y manejo de las yemas en vivero y campo (Deantonio-Florido et al., 2021; Ramírez Durán et al., 2019).

Sumado a esto, la viabilidad y el vigor de las yemas pueden generar calidades diferentes al obtener plantas germinadas grandes, medianas y pequeñas (figura 1.6) en un mismo periodo (90 días después de la siembra [DDS]); sin embargo, es posible extender su ciclo vegetativo y alcanzar las dimensiones ideales promedio (ALPLA de 5,24-5,72 cm; DIATA de 7,04-7,59 mm, y cespedón bien formado) para ser ubicadas en el sitio definitivo en campo o en futuros semilleros. En ese caso, las plantas que a los 90 DDS sean medianas y pequeñas requieren estar 30 y 60 días adicionales, respectivamente, en patio de crecimiento (AGROSAVIA, 2018).



Figura 1.5. Etiqueta modelo para la identificación de semilla seleccionada.

Fuente: Departamento de Semillas de AGROSAVIA



Figura 1.6. Plantas germinadas del cultivar de caña de azúcar CC 93-7711, 90 DDS, producidas bajo las condiciones agroecológicas de Barbosa, Santander. a. Plántula grande; b. Plántula mediana; c. Plántula pequeña.

Fotos: Juan Carlos Lesmes Suárez

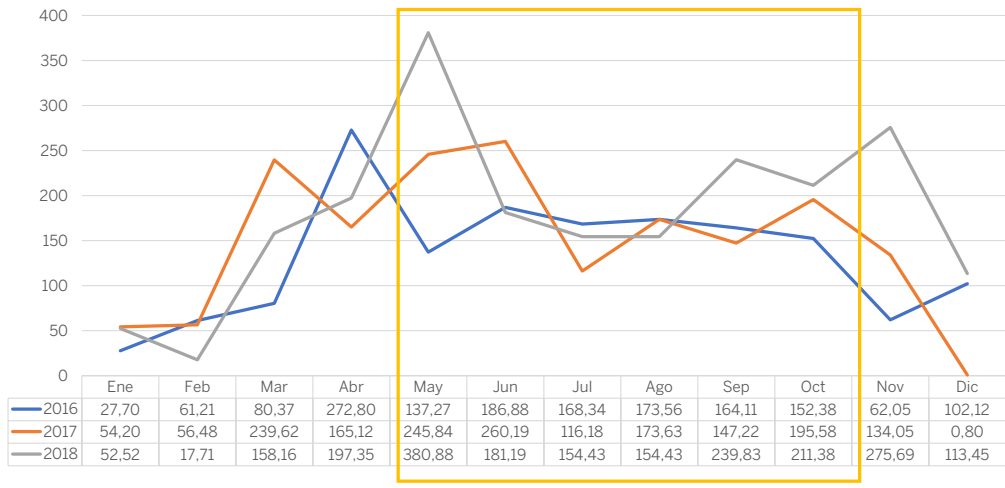
Otra variable es la calidad asociada a la producción y eficiencia en la obtención de semilla seleccionada, dada por la viabilidad y el número de las yemas aprovechables. A continuación, se describen los indicadores evaluados en un estudio de caso desarrollado en la Hoya del Río Suárez por tres ciclos de producción de semilla.

Porcentaje de germinación de yemas

El material proveniente del huerto básico, con una edad promedio de 7,5-8,5 meses, con imbibición de las yemas en agua por un periodo de 1-3 horas y posterior siembra (AGROSAVIA, 2018), presentó un porcentaje de germinación entre el 51,73 % y el 88,11 %.

La variación en el porcentaje de germinación podría estar relacionada con las condiciones climáticas registradas durante el periodo de producción en el que se realizó la cosecha, la siembra

y la germinación de la caña (mayo-octubre de 2016, 2017 y 2018); como se indica en la figura 1.7, la precipitación fluctuó ampliamente durante los meses señalados.



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2016	27,70	61,21	80,37	272,80	137,27	186,88	168,34	173,56	164,11	152,38	62,05	102,12
2017	54,20	56,48	239,62	165,12	245,84	260,19	116,18	173,63	147,22	195,58	134,05	0,80
2018	52,52	17,71	158,16	197,35	380,88	181,19	154,43	154,43	239,83	211,38	275,69	113,45

Figura 1.7. Precipitación promedio (mm) registrada en el periodo 2016-2018 y meses de evaluación y producción de la semilla seleccionada o las plantas germinadas.

Fuente: Sede Cimpa de AGROSAVIA (Barbosa, Santander)

Porcentaje de plantas trasplantadas

En los tres ciclos de producción, el promedio de yemas germinadas fue del 96,52 %. Las plántulas trasplantadas se clasificaron en tres categorías, en función del tamaño alcanzado; en promedio, la proporción de plantas obtenidas fue la siguiente: grandes (9-12 cm): 40,50 %; medianas (5-8 cm): 31,04 %; pequeñas o "fósforo" (menos de 5 cm): 28,46 %. Al analizar cada ciclo, se registró una variación del 51,73 % al 87,67 %, lo que confirmó que las condiciones climáticas y la incidencia de enfermedades fungosas (*Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia* sp., *Phytophthora* sp. y *Pythium* sp.), sumadas a una excesiva manipulación de las yemas extraídas, podrían afectar la calidad de la semilla (AGROSAVIA, 2018).

Porcentaje de pérdida de plantas en patio de crecimiento

Es posible registrar pérdidas finales del 8,06 % al 10,97 % en patio de crecimiento o etapa de desarrollo, a causa de la inadecuada o incompleta formación del cespedón, es decir, por un deficiente sistema radicular (poco compacto y vigoroso); son plantas que no cumplen con el tamaño y el vigor requeridos para ir a la siembra en campo y plantas con una deficiente formación del sistema radicular por exceso de humedad en el cespedón.

Como mencionamos, estos indicadores podrían orientar la adecuada producción de la semilla, en particular para renovar los cultivos de caña. En tal sentido, se deben considerar los siguientes aspectos que podrían mejorar la toma de decisiones:

- Las variedades de caña de azúcar que se han de emplear para multiplicación y siembra deben estar registradas ante el ICA o haber sido entregadas al subsector panelero luego de su introducción y evaluación controlada. Como producto de esto, se cuenta con fichas técnicas que contienen información de referencia del potencial productivo y su capacidad adaptativa en regiones paneleras, previniendo la movilización de limitantes fitosanitarias y asegurando su adaptación y producción.
- Un cultivo de caña con sistemas de corte por parejo en zonas paneleras podría presentar en promedio entre cinco y siete cortes antes de su renovación; esto, considerando un buen manejo agronómico para el levantamiento de socas (prácticas de encalle, cepillado y resiembra), lo cual permite establecer los requerimientos de material de siembra y los tiempos de renovación.
- Se requiere determinar el balance beneficio/costo en función del rendimiento y los costos de producción de la semilla o material de siembra, con lo cual se promueve la planificación del cultivo, la ampliación o renovación de áreas cultivadas y una mayor rentabilidad para los productores de caña, panela e incluso semilla.

Semilleros

Los semilleros son áreas exclusivas destinadas a la obtención de semilla de calidad para caña de azúcar. Buenaventura (1990) propuso tres tipos de semilleros: básicos, semicomerciales y comerciales, que tienen como factor común el tratamiento sanitario (químico o por termoterapia) de la semilla. La Resolución 1696 de 1984 del ICA amplía estos conceptos, así: el semillero básico es sembrado con semilla básica; el semillero semicomercial es aquel que se siembra con semilla básica o con semilla de la soca de otro semillero semicomercial, y el semillero comercial es aquel que se siembra con semilla procedente de un semillero semicomercial y a partir del cual se realiza la distribución de la semilla para siembras comerciales. La semilla procedente de este tipo de semillero se denomina "semilla seleccionada".

Se reitera que el número de cosechas o cortes de los semilleros para aprovechar la semilla es de uno (Osorio, 2007) o máximo dos, sin importar el método de propagación, pues así se asegura la pureza varietal y la sanidad vegetal (Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Ramírez Durán et al., 2019). El principal **indicador de calidad de los semilleros** de caña es el número de *yemas viables* por tallo, el cual tiene relación directa con la edad de la caña en el momento del corte (tabla 1.2). Al aumentar la edad de los tallos, estos ganan peso, pero, paralelamente, aceleran la maduración de los tejidos, lo que promueve su lignificación y la acumulación de una alta cantidad de azúcares, como la sacarosa, razón por la cual se reduce el número de yemas viables de la base hacia el ápice del tallo (AGROSAVIA, 2018).

Tabla 1.2. Relación entre la edad y el número de yemas viables por hectárea de caña de la variedad CC 93-7711 cultivada en dos localidades de Santander

Localidad	Edad (meses)	Yemas viables por tallo	Rango del número de yemas viables/ha		Peso del tallo (kg)	Rango de tallos con yemas viables (t/ha)	
Provincia de Vélez*	7,5	8	576.000	716.000	0,85	60,91	75,72
	8	8	576.000	716.000	0,86	62,06	77,15
	8,5	8	576.000	716.000	0,88	63,07	78,40
	9	7	504.000	626.500	0,90	64,44	80,10
	9,5	7	504.000	626.500	0,91	65,38	81,27
	10	6	432.000	537.000	0,91	65,81	81,80
	10,5	5	360.000	447.500	0,95	68,11	84,67
Provincia de Guanentá**	7,5	10	720.000	895.000	0,86	62,21	77,33
	8	10	720.000	895.000	0,88	63,07	78,40
	8,5	10	720.000	895.000	0,89	64,30	79,92
	9	10	720.000	895.000	0,91	65,45	81,36
	9,5	10	720.000	895.000	0,93	66,89	83,15
	10	10	720.000	895.000	0,94	67,82	84,31
	10,5	9	648.000	805.500	0,96	68,83	85,56

* Valor calculado con una población de 72.000-89.500 tallos/ha.

** Valor calculado con una población de 69.000-89.000 tallos/ha.

Fuente: AGROSAVIA (2018)

Como se ha indicado, la viabilidad de las yemas está directamente relacionada con su ubicación en el tallo: los tercios medio

y superior presentan yemas tiernas y con mayor probabilidad de germinación, mientras que las yemas ubicadas en la base del tallo cuentan con menos viabilidad con el paso del tiempo. Las yemas pueden presentar inviabilidad y, con esto, menor probabilidad de germinación, si presentan algunas de las siguientes características (figura 1.8):

- Yemas demasiado tiernas (con menos de siete meses de edad) o muy maduras (con más de diez meses de edad).
- Yemas con daños mecánicos causados por la manipulación inadecuada de los tallos o con heridas en el momento del corte, y tallos partidos o doblados, con afectación de nudos y yemas.
- Yemas con daños generados por insectos barrenadores como *Diatraea* spp., *Blastobasis graminea* y *Podischnus agenor*, entre otros.
- Yemas brotadas o con presencia de raíces (ubicadas en la base de los tallos), o yemas provenientes de tallos con malformaciones, flácidos, deshidratados o delgados, o con presencia de pudriciones provocadas por agentes patógenos como *Colletotrichum falcatum* Went. (*Glomerella tucumanensis* [Speg.] Arx & E. Muller, como estado perfecto) o *X. albilineans*, entre otros (AGROSAVIA, 2018).

La producción de semilla, representada en toneladas de caña por hectárea (TCH), es también un **indicador de producción** que depende de la edad de los semilleros y del número de yemas viables para la producción de semilla (AGROSAVIA, 2018). Esta información es de utilidad debido a que la compra de esquejes se realiza por peso (t/ha); el peso de referencia para la siembra de 1 hectárea de semillero es de 7 a 9 toneladas de caña, dependiendo de la variedad. Los ciclos de cultivo oscilan entre 16 y 20 meses, por lo cual la obtención de semilla se realiza en un primer ciclo, conocido como "plantilla", y los ciclos subsiguientes se restringen para obtener semilla, y se prioriza la cosecha de los tallos para su transformación en panela.



Figura 1.8. Características de las yemas de la caña para la extracción. a. Yemas viables; b. Yemas inviables.

Fuente: AGROSAVIA (2018)

En cuanto a la **calidad fisiológica del semillero**, se podría afirmar que está en función del comportamiento de la variedad o cultivar, así como del tipo de semilla de origen con el que inicia el semillero. Las variables relacionadas con este indicador son:

- Prendimiento en campo: a los 30 DDS, las plantas germinadas presentaron un porcentaje de prendimiento promedio del 95,23 %

al 99,9 % con plantas de la variedad CC 93-7711, y del 89,93 % con la variedad CC 93-7510; esto, con un manejo agronómico basado en prácticas del productor y con riego semanal (AGROSAVIA, 2018).

- Altura de la planta (ALPLA): existe diferencia estadística significativa entre esquejes y plantas germinadas de los cultivares CC 93-7711 y CC 93-7510. En semilleros con nueve meses de edad establecidos en el municipio de Güepsa (Santander), se presentaron plantas de la variedad CC 93-7711 con una altura promedio de 2,10 m con esquejes y de 1,12 m con plantas germinadas, mientras que plantas del cultivar CC 93-7510 presentaron alturas promedio de 2,07 m con esquejes, frente a 1,14 m con plantas pregerminadas (AGROSAVIA, 2018).
- Diámetro del tallo (DIATA): esta variable es representativa del crecimiento de los cultivares comerciales de caña para panela, y una característica sobresaliente en el cultivar CC 93-7711 (Ramírez Durán, Insuasty Burbano & Murcia Pardo, 2014). Semilleros con nueve meses de edad presentaron un DIATA de 3,28 cm en plantas provenientes de esquejes y de 3,08 cm con plantas germinadas del cultivar CC 93-7711, sin diferencias estadísticas significativas. En plantas del cultivar CC 93-7510 con la misma edad, la caña alcanzó 2,99 cm de DIATA cuando provenía de esquejes, y 2,97 cm cuando provenía de plántulas pregerminadas (AGROSAVIA, 2018). Con estos resultados, se podría inferir que el diámetro de los tallos es una característica propia de los cultivares producto de su interacción con las condiciones medioambientales —indicando vigor en el desarrollo de la caña y un ideal de calidad fisiológica y genética—, más que una variable dependiente del tipo de semilla que se cultive.
- Población de tallos por metro lineal: esta variable, usada en la evaluación del crecimiento y desarrollo de la caña, integra características genéticas de los cultivares de caña para panela y permite estimar la producción de semilla por hectárea; además, es un referente en los sistemas de comercialización de semilla de caña de azúcar para panela en Colombia. Al comparar la población de tallos de semilleros para los cultivares CC 93-7711 y CC 93-7510 nueve meses después de siembra, se presentaron

diferencias estadísticas entre las plantas provenientes de esquejes y las plantas germinadas. Con plantas del cultivar CC 93-7711, la población de tallos por metro lineal fue de 12 para plantas sembradas con esquejes y de 14 para plantas germinadas, mientras que, con el cultivar CC 93-7510, este valor fue de 14 tallos por metro lineal empleando las semillas mencionadas.

Es importante dimensionar y valorar la calidad de la semilla, puesto que las principales plagas —*Diatraea* spp., hormiga loca (*N. fulva*), salivazo (*A. varia*), cucarrón de invierno (*P. agenor*) y pulgones, entre otras— se podrían transportar en los esquejes y ocasionar reducción en el rendimiento de la caña para panela. En este sentido, el indicador de **calidad sanitaria** de los semilleros se basó en la intensidad de infestación (I. I.) de *Diatraea* spp. (tabla 1.3), dado que es la de mayor diseminación e impacto económico sobre las plantaciones de caña. Las parcelas de semilleros seleccionadas presentaron valores por debajo del 4 % en I. I., correspondiente a un estado denominado "sano" (tabla 1.4). Se resalta que en los predios evaluados no se realizaron prácticas de manejo integrado de estos barrenadores, ni liberación de controladores biológicos; es decir, la respuesta al daño causado por *Diatraea* spp. fue posible por la presencia de controladores biológicos nativos y las prácticas culturales favorables para la caña.

Tabla 1.3. Descripción y valores asociados a la I. I. causada por *Diatraea* spp.

Estado	I. I. (%)*
Sano	< 4
Dañado	Entre 4 y 10
Muy dañado	> 10

* Valor calculado como el porcentaje del total de entrenudos barrenados por el total de entrenudos evaluados.

Fuente: Elaboración propia con base en Vargas y Gómez (2005)

Tabla 1.4. Porcentaje de la I. I. de *Diatraea* spp. registrado en semilleros del cultivar CC 93-7711 en las provincias de Vélez y Guanentá (Santander)

Localidad	Parcela	I. I. (%)
Provincia de Vélez	1	2,52
	2	2,40
	3	2,87
	4	3,20
	5	2,90
Provincia de Guanentá	1	1,09
	2	2,00
	3	2,84
	4	3,22
	5	3,08

Fuente: AGROSAVIA (2018)

Conceptualización del modelo de producción de semilla seleccionada

El modelo de producción de semilla de calidad para la agroindustria panelera integra la normatividad, los conceptos de calidad y las contribuciones técnicas sobre la producción de semilla seleccionada (Buenaventura, 1990; Murcia Pardo & Ramírez Durán, 2015; Murcia-Pardo & Ramírez-Durán, 2017; Ramírez Durán et al., 2019; Ramírez Durán & Murcia Pardo, 2014). En la figura 1.9 se presenta el modelo propuesto, conformado por tres ejes: la producción de plantas germinadas, los semilleros hasta la siembra de nuevos cultivos comerciales y la propagación masiva de semilla con métodos tradicionales.

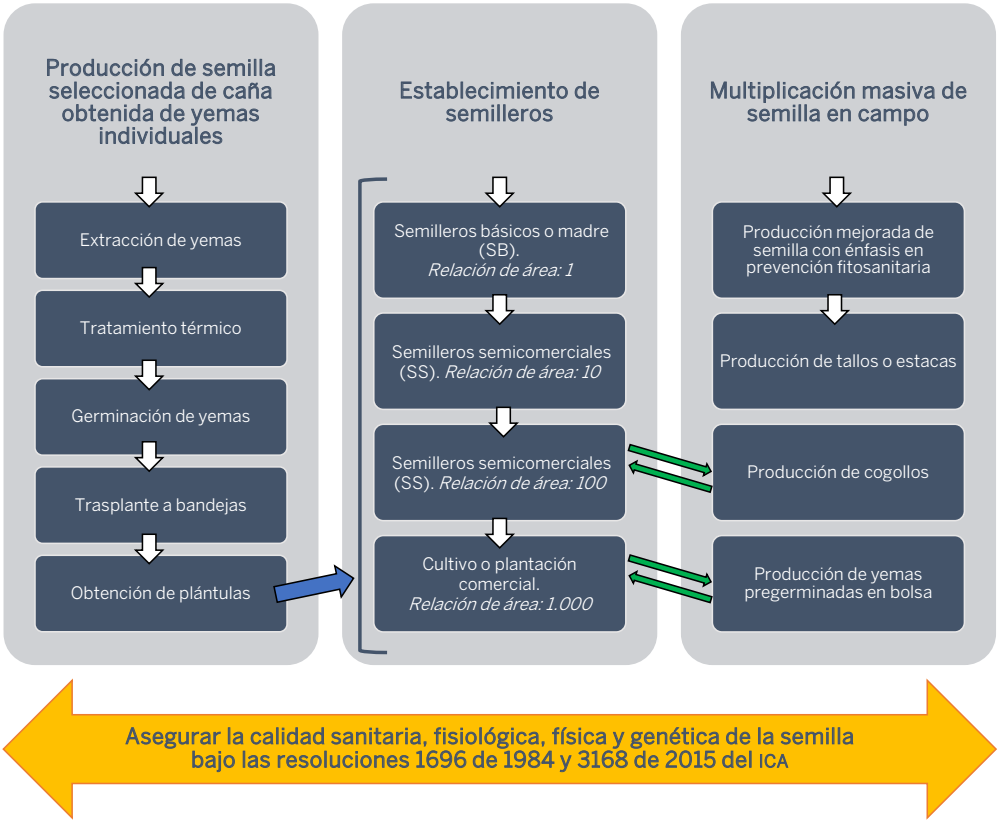


Figura 1.9. Esquema de producción de semilla de calidad y semilleros de caña de azúcar para panela.

Fuente: Elaboración propia con base en Buenaventura (1990) y AGROSAVIA (2018)

Conclusiones

Los actuales avances en la producción de semilla de caña de azúcar para el sector panelero representan información importante y de referencia que puede ser replicada y perfeccionada para masificar su uso en Colombia. De acuerdo con los estudios realizados, no solo de semilla sino también de las nuevas variedades y cultivares de esta especie, se reitera el papel fundamental de la semilla, así como de sus parámetros de calidad, pues podrían asegurar un mayor éxito y rendimiento en la producción comercial

de caña de azúcar y de panela. Se demanda consolidar estudios similares sobre los criterios de calidad de la semilla y de los semilleros, como aporte a la reglamentación de la normatividad existente. Asimismo, es importante considerar la ampliación de investigaciones bajo condiciones agroecológicas, de producción y de respuesta varietal contrastantes, con miras a responder a la intensificación de la producción y a las limitantes bióticas y abióticas a las cuales están expuestos la semilla y los semilleros en los entornos productivos.

Agradecimientos

La información presentada en este capítulo fue obtenida durante el desarrollo del proyecto "Caña. Modelos para la producción de semilla. Fase I, II y III", enmarcado en el plan semilla "Conformación de núcleos productores de semilla de caña a partir de plantas obtenidas mediante la extracción de yemas y establecimiento de semilleros comerciales en los departamentos de Santander, Boyacá y otras regiones que demandan la tecnología", financiado con recursos públicos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y ejecutado por AGROSAVIA. Se extiende un agradecimiento a los profesionales de apoyo a la investigación de la sede Cimpa de AGROSAVIA: Richard Jhon Sánchez Jiménez y Magda Liliana Murcia Pardo, quienes participaron y apoyaron en el desarrollo del proyecto, así como a colaboradores de las diferentes dependencias técnico-administrativas.

Referencias

Álvarez, R., & Farías, A. (2012). *Modelo productivo para el cultivo de caña panelera* (Saccharum officinarum) *en la Hoya del Río Suárez (Paquete Tecnológico)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Barona Rodríguez, A. F., Antolinez Sandoval, E. Y., López Lopera, J. G., Viveros Valens, C. A., Jiménez Vargas, J., Ángel Sánchez, J. C., Ballesteros Araque, A. L., & Vargas Orozco, G. A. (2021).

Comportamiento agroindustrial de seis variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) para panela en Barbosa (Colombia). *Revista Ciencia y Agricultura*, *18*(3), 15-28. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8132334

Barona-Rodríguez, A. F., Insuasty-Burbano, O. I., Viveros-Valens, C. A., Ángel-Sánchez, J. C., & Ramírez-Durán, J. (2020). Evaluación de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) para producción de panela en el departamento de Boyacá, Colombia. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, *23*(2). http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1298

Buenaventura, C. (1990). Semilleros y siembra de la caña de azúcar. *Serie Técnica Cenicaña*, (6).

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña]. (2023, 18 de enero). *Servicio de diagnóstico de enfermedades*. https://www.cenicana.org/servicio-de-diagnostico-de-enfermedades-2

Congreso de Colombia. (2019, 2 de diciembre). Ley 2005 de 2019. "Por medio de la cual se generan incentivos a la calidad, promoción del consumo y comercialización de panela, mieles vírgenes y sus derivados, así como la reconversión y formalización de los trapiches en Colombia y se dictan otras disposiciones". *Diario Oficial, n.° 51.155.* https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%20 2005%20DEL%2002%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202019.pdf

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (2018). *Informe técnico final del proyecto "Conformación de núcleos productores de semilla de caña a partir de plantas obtenidas mediante la extracción de yemas y establecimiento de semilleros comerciales en los departamentos de Santander, Boyacá y otras regiones que demandan la tecnología"* [documento interno].

Deantonio Florido, L. Y., & López González, X. (2020). *Sistema de producción de semillas de caña de azúcar para panela mediante la obtención de plantas germinadas* [video]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). http://hdl.handle.net/20.500.12324/36506

Deantonio-Florido, L. Y., Bautista Montealegre, L. G., Lesmes Suárez, J. C., & Cardona, W. A. (2021). Allometric response of two sugarcane cultivars for panela to foliar fertilization in the nursery. *Agronomía Mesoamericana*, *32*(2), 422-441. https://doi.org/10.15517/am.v32i2.43297

Digonzelli, P. A., Giardina, J. A., Duarte, D., Fajre, S., Medina, M. M., Barceló, M. F., & Pérez Alabarce, J. F. (2019). Producción de caña semilla de alta calidad en semilleros Básicos y Registrados de la provincia de Tucumán: un análisis de cinco años (2014-2018). *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, *39*(2), 117-125. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-369X2019000200005&lng=es&tlng=es

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (1984, 6 de agosto). Resolución 1696 de 1984. *Por la cual se adoptan requisitos fitosanitarios para la producción de semilla de caña de azúcar*. http://www.ica.gov.co/getattachment/478f0027-2062-4a2f-9011-9c592fdd2376/1984R1696.aspx

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2015, 7 de septiembre). Resolución 3168 de 2015. *Por medio de la cual se reglamenta y controla la producción, importación y exportación de semillas producto del mejoramiento genético para la comercialización y siembra en el país, así como el registro de las unidades de evaluación agronómica y/o unidades de investigación en fitomejoramiento y se dictan otras disposiciones*. http://www.ica.gov.co/getattachment/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx

Jain, R., Solomon, S., Shrivastava, A. K., & Chandra, A. (2010). Sugarcane bud chips: A promising seed material. *Sugar Tech*, *12*, 67-69. https://doi.org/10.1007/s12355-010-0013-9

Jiménez, E. (1995). *Propagación* in vitro *de la caña de azúcar* (Saccharum *spp. híbrido*) [tesis de doctorado, Universidad Central de Las Villas].

López Lopera, J. G. (2014). *Manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar para panela en Antioquia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1957/77628_66488.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lorenzo, J. C., González, B. L., Escalona, M., Teisson, C., & Borroto, C. (1998). Sugarcane shoot formation in an improved temporary immersion system. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *54*, 197-200. https://doi.org/10.1023/A:1006168700556

Manrique Estupiñán, R. (2011). *Establecimiento de cultivo y levante de socas*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Universidad de Pamplona. http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_4/mod_virtuales/modulo1/index.html

May, A., & Ramos, N. P. (2019). Uso de gemas individualizadas de cana-de-açúcar para a produção de mudas. *Circular Técnica Embrapa*, (29). https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197206/1/Andre-May-CT-29.pdf

Murcia Pardo, M. L., & Ramírez Durán, J. (2015). *Producción y manejo de semilla de caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/34328/66414.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Murcia-Pardo, M. L., & Ramírez-Durán, J. (2017). Reconversión del sistema regional de producción de semilla de caña para la agroindustria panelera en Boyacá y Santander. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *18*(1), 75-87. http://revista.corpoica.org.co/index.php/revista/article/view/559/436

Osorio, G. (2007). *Manual técnico. Buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas de manufactura (BPM) en la producción de caña y panela*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Gobernación de Antioquia; FAO. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18313

Programa para Incrementar la Competitividad del Sector Azucarero (Proicsa). (2019). *Producción de caña. Semilla de alta calidad para los pequeños productores de caña de azúcar de la Provincia de Tucumán*. Secretaría de Agroindustria, Ministerio de Producción y Trabajo, Presidencia de la Nación [Argentina]. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/proicsa_3-cana_semilla.pdf

Ramírez Durán, J., Cañar Serna, D. Y., Deantonio Florido, L. Y., & Hernández Nopsa, J. F. (2019). *Manual técnico para la producción de plántulas de caña de azúcar para panela a partir de yemas individuales bajo las condiciones agroecológicas del municipio de Barbosa (Santander)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://hdl.handle.net/20.500.12324/35065

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Murcia Pardo, M. L. (2014). *Variedades de caña de azúcar empleadas para la agroindustria panelera de Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://hdl.handle.net/20.500.12324/12621

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *15*(2), 183-195. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-87062014000200005

Ramírez Durán, J., & Murcia Pardo, M. L. (2014). *Implementación del sistema de producción de plantas de caña de azúcar para el establecimiento de semilleros básicos y comerciales*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/1069

Rodríguez Borray, G. A., Huertas Carranza, B., Polo Murcia, S. M., González Chavarro, C. F., Tauta Muñoz, J. L., Rodríguez Cortina, J., Ramírez Durán, J., Velásquez Ayala, F. A., Espitia González, J. J., & López Zarazá, R. A. (2020). *Modelo productivo de la caña de azúcar* (Saccharum officinarum) *para la producción de panela en Cundinamarca*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://hdl.handle.net/20.500.12324/35698

Srivastava, S., & Kumar, P. (2020). Application of advanced seed production techniques in sugarcane crop improvement. En A. Kumar Tiwari (Ed.), *Advances in seed production and management* (pp. 29-42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4198-8_2

Tarazona Parra, G. A. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera: medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). https://www.ica.gov.co/getattachment/6a54658e-1723-488d-a7ab-2f4baad793cb/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-cana-panele.aspx

Vargas, G. A., & Gómez, L. A. (2005). *Evaluación del daño causado por* Diatraea *spp. en caña de azúcar y su manejo en el valle del río Cauca*. Cenicaña. https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_divulgativa/sd_09/sd_09.pdf

Victoria, J. I., & Calderón, H. (1995). *Establecimiento de semilleros y multiplicación de variedades*. Cenicaña.

Viveros, C. A., Cassalett, C., & Victoria, J. I. (1997). Multiplicación rápida de la caña de azúcar por el sistema de plantas germinadas. *Serie Técnica Cenicaña*, (23). https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_23/st_23.pdf



Capítulo 2

Biofertilización de caña de azúcar para panela en la Hoya del Río Suárez con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA)

María Margarita Ramírez Gómez, Diana Paola Serralde Ordóñez, Andrea María Peñaranda Rolón, Wilmar Alexander Wilches Ortiz, Luciano Ramírez, Yuli Marcela Ordóñez Castañeda y Carlos Felipe González-Chavarro

Resumen

Un problema de la caña de azúcar para panela está relacionado con la inadecuada fertilización del cultivo, lo que genera altos costos de producción y un desbalance nutricional. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como una alternativa de biofertilización para mejorar la eficiencia de la nutrición de las plantas. Se realizaron evaluaciones en parcelas demostrativas en los municipios de Ocamonte y Oiba, en Santander, y Chitaraque, en Boyacá. Los beneficios agronómicos se observaron en el incremento de la producción de toneladas de caña y panela (entre el 2 % y el 61 % para caña, y entre el 5 % y el 54 % para panela, dependiendo de la variedad); los económicos, en la reducción de costos de fertilización debido a la sustitución de hasta el 50 % de la fertilización química, y los ambientales, en la reducción de residuos de fertilizantes que contaminan suelos y aguas, así como en la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados, que están asociados con la producción de gases de efecto invernadero. Finalmente, las mejoras en la inocuidad de la panela se relacionan con la reducción de fertilizantes de síntesis química.

Palabras clave: nutrición vegetal, micorrizas arbusculares, biofertilización, análisis económico

Introducción

La caña de azúcar para panela es un cultivo permanente que extrae grandes cantidades de nutrientes del suelo en cada cosecha (Chi et al., 2017; Hussain et al., 2017; Mthimkhulu et al., 2016). Los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar para panela están relacionados con su elevada extracción y remoción de nutrientes del suelo y su alta producción de biomasa. La capacidad de absorción de los nutrientes del suelo cambia con la variedad, ya que, en igualdad de condiciones edafoclimáticas, algunas de ellas pueden absorber mayores o menores cantidades de nutrientes y tener rendimientos diferenciales en producción de caña y panela (t/ha). De acuerdo con Sediyama et al. (2010), la cantidad de nutrientes extraídos por los cultivos ha sido un indicador que permite hacer un mejor uso de los fertilizantes, dependiendo de la variedad y del estado fenológico del cultivo.

En algunas zonas paneleras del país no se tienen planes de fertilización adecuados: muchos productores no fertilizan o lo hacen sin tener en cuenta las condiciones del suelo. Sumado a esto, la fertilización se realiza de forma empírica, no se realizan análisis de suelos y se utiliza el fertilizante más económico del mercado, o el recomendado por los vendedores de insumos, sin ningún criterio técnico. Esta mala práctica ha generado problemas nutricionales en el cultivo y degradación en suelos paneleros, relacionada con problemas de desbalances nutricionales; todo eso, acompañado de problemas de erosión y compactación, afecta la competitividad y sostenibilidad del cultivo.

Para dar respuesta a los problemas nutricionales de la caña de azúcar para panela, AGROSAVIA (antes Corpoica) y el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) han desarrollado investigaciones encaminadas a la optimización de la fertilización del cultivo, a partir de alternativas de nutrición integral que le permiten al productor tener cultivos más productivos, sostenibles y que generen mayor rentabilidad económica y ventajas ambientales.

El proyecto "Recomendaciones de fertilización para cinco regiones productoras de caña panelera en diferentes sistemas de corte" combinó la fertilización orgánica con el uso de fertilizantes de síntesis química, lo que dio como resultado un aumento del 15 %-25 % en la productividad en los sistemas de corte por entresaque y por parejo. Adicionalmente, se evaluó la fertilización utilizada por el agricultor en comparación con el plan de fertilización basado en el análisis de suelos y el fraccionamiento de los fertilizantes de síntesis química a los dos y cuatro meses después de la siembra, plan que presentó un aumento del 20 %-30 % en los rendimientos de caña y panela (Ramírez Durán et al., 2014).

Entre 2015 y 2018 se desarrolló el proyecto "Requerimientos nutricionales de tres variedades de caña de azúcar para panela, determinados a través de curvas de absorción para primer y segundo corte de cultivo en cuatro localidades paneleras del país", en el cual se determinó la extracción de nutrientes del cultivo de caña de azúcar para panela. Con esta información, se ajustaron las recomendaciones de fertilización bajo las condiciones edafoclimáticas de zonas productoras de caña de azúcar para panela (González Chavarro et al., 2018). Estas investigaciones están orientadas a la obtención de una oferta tecnológica con una base científica sólida, que ofrezca al productor una recomendación de fertilización integral que aporte a la competitividad y sostenibilidad del sector panelero, y a la inocuidad de la panela.

Desde 2018, en el proyecto "Optimización de la fertilización del cultivo de caña panelera a partir de alternativas de nutrición integral y balance de nutrientes", se recopilaron los resultados previos relacionados con requerimientos nutricionales y fertilización fraccionada, con el fin de optimizar las recomendaciones incorporando el uso de microorganismos benéficos, como parte de una fertilización integral (química y biológica), empleando hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA).

El modelo de investigación desarrollado para la fertilización integral de caña de azúcar para panela parte de la identificación de

las principales comunidades de HFMA asociados de forma natural a suelos paneleros de diversas zonas productoras de Colombia (Santander, Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander, Eje Cafetero, Nariño, Cauca, Antioquia y Cesar). Algunos de estos microorganismos fueron evaluados y seleccionados a nivel de vivero y campo en la Hoya del Río Suarez (HRS), en Boyacá y Santander, bajo un esquema de fertilización integral que dio como respuesta una recomendación de fertilización química y biológica con resultados potenciales en términos de desarrollo agronómico del cultivo y productividad, los cuales fueron validados en parcelas semicomerciales en Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá), comparando la recomendación de uso de HFMA con el manejo convencional del agricultor (Ramírez Gómez et al., 2020; Wilches Ortiz et al., 2019).

Los HFMA son hongos ubicuos en el suelo que pueden establecer una simbiosis obligada con la mayoría de las plantas de interés agronómico. Esta simbiosis mutualista se caracteriza por el intercambio de nutrientes: la planta entrega al hongo polisacáridos como fuente de carbono, y en retorno recibe minerales (Smith & Read, 2008). Algunas de las características que contribuyen al éxito de la simbiosis están relacionadas con la presencia de hifas extrarradicales, que tienen un diámetro de 2-20 µm, actúan como una extensión del sistema radicular de la planta y pueden penetrar en espacios del suelo donde las raíces no alcanzan a llegar y, de esta forma, absorber nutrientes disponibles por fuera de la zona de agotamiento (Nadeem et al., 2014). Por su parte, las hifas intrarradicales crecen en el espacio inter e intracelular en las raíces de las plantas, pueden atravesar la pared celular de las células corticales y luego ramificarse profusamente en el interior de la célula, formando unas estructuras denominadas "arbúsculos", donde se lleva a cabo el intercambio de nutrientes entre los dos organismos (Hause & Fester, 2005).

Se ha demostrado que diferentes interacciones planta-HFMA exhiben una variedad de respuestas dependiendo de la especie/variedad de la planta y de la especie/aislamiento de HFMA que participa de la

simbiosis (Ceballos et al., 2019; Ortas & Ustuner, 2014), por lo que la investigación sobre la evaluación y selección de inóculos de HFMA debe considerar las condiciones edafoclimáticas, la variedad y las condiciones sobre las que se desarrolla el cultivo.

Los HFMA tienen la facultad de actuar como biofertilizantes al estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante su participación en procesos de nutrición vegetal (Elliott et al., 2021; Frew, 2021); lo hacen como biocontroladores, mitigando el impacto de plagas y enfermedades, y como biorremediadores, inmovilizando metales pesados; todo esto, con un impacto mínimo en el medio ambiente (Mamani de Marchese & Filippone, 2018).

La simbiosis micorrícica se destaca principalmente por incrementar la biomasa vegetal de la planta hospedera y la concentración de nutrientes, lo cual ha llamado la atención en la producción agrícola y ha facilitado el uso de estos hongos como biofertilizantes. De esta forma, se ha propuesto esta estrategia para reducir el uso excesivo de fertilizantes de síntesis química hasta en un 50 %, lo que reduce los costos de producción para el agricultor (Begum et al., 2019).

La eficacia de estos microorganismos ha sido comprobada en cultivos de importancia nacional y mundial como la yuca (*Manihot esculenta*) (Ceballos et al., 2013), la papa (*Solanum tuberosum*) (Hijri, 2016), el arroz (*Oryza sativa*) (Campo et al., 2020), la caña (*Saccharum officinarum*) (Ramírez Gómez et al., 2020), especies forestales (como *Pachira quinata* y *Gmelina arborea*) (Ramírez Gómez et al., 2018), la uchuva (*Physalis peruviana*) (Ramírez Gómez et al., 2008) y el maíz (*Zea mays*) (Serralde & Ramírez, 2004).

Este capítulo tiene como objetivo presentar la fertilización biológica e integral, sus ventajas ambientales y económicas, y su impacto en la competitividad y sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar para panela.

Metodología

La metodología describe las acciones realizadas para el aislamiento e identificación de HFMA en zonas productoras de caña, para determinar su diversidad, y los pasos seguidos para su multiplicación, con el fin de obtener los inóculos que se emplearon en los ensayos de investigación. Igualmente, se describe la metodología desarrollada para el análisis agronómico y agroindustrial a nivel de parcelas demostrativas, así como la utilizada para el análisis económico.

Aislamiento, identificación y multiplicación de HFMA

A partir de muestras de suelo de aproximadamente 1 kg, tomadas en los departamentos de Boyacá y Santander (HRS), Antioquia, Cauca, Cesar, Quindío, Risaralda, Caldas, Nariño, Cundinamarca y Norte de Santander, en zonas productoras de caña de azúcar para panela (figura 2.1), se aislaron, identificaron, multiplicaron y escalaron comunidades nativas de esporas de HFMA.

Para poder identificar los HFMA aislados en diversos suelos, es necesario realizar una multiplicación inicial que permita tener un número suficiente de esporas, para lo cual se utilizó la metodología de Morton y Benny (1990), que consiste en la multiplicación de esporas en plantas trampa, aumentando el volumen de sustrato, con el fin de estimular la esporulación del hongo e incrementar la concentración de las comunidades de HFMA. Este proceso se realizó a partir de muestras de suelo asociadas al cultivo en cada uno de los municipios. Adicionalmente, se tomaron muestras de raíz con el fin de evaluar el nivel de asociación natural de las plantas de caña con HFMA. En total, se muestrearon entre tres y cuatro fincas por municipio, para un total de 75 fincas bajo estudio.

Para el aislamiento y cuantificación de esporas, se empleó la metodología de decantación húmeda, propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), la cual consiste en extraer, a través de la formación de una interfase de solución de sacarosa, las esporas

contenidas en la muestra de suelo. Para la identificación morfológica de esporas, se tomó de cada municipio una muestra compuesta; luego, las esporas aisladas se separaron por sus características macroscópicas observadas en estereoscopio (tamaño, color, brillo, entre otras), y se llevaron a láminas para ser observadas en microscopio, para determinar géneros y morfoespecies, partiendo de las características morfológicas de las esporas (tamaño, color, número de paredes, grosor de las paredes, forma de unión de la hifa con la espora, presencia de escudos o puntos

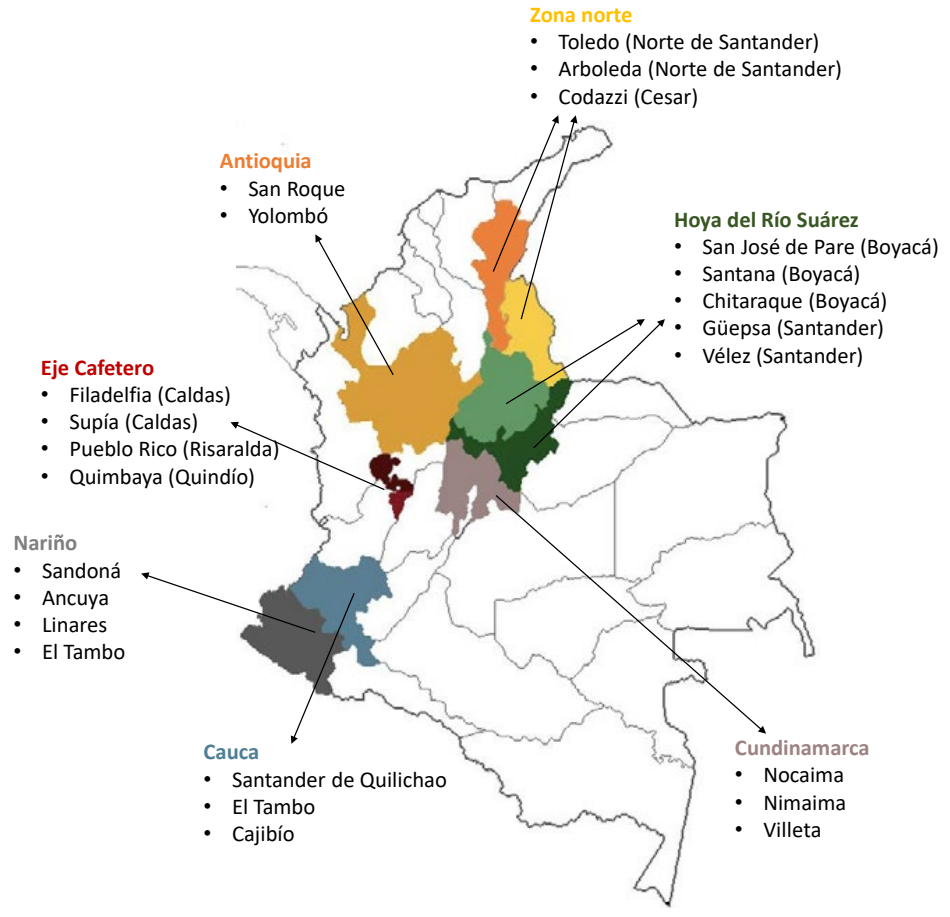


Figura 2.1. Hussain et al., 2017; Mthimkhulu et al., 2016 Municipios de Colombia donde fueron tomadas las muestras de suelo para el aislamiento de HFMA.

Fuente: Elaboración propia

de germinación, y reacción a colorantes específicos), formación de tipo de espora (glomoide, acaulosporoide, entrophosporoide, gigasporoide y scutellosporoide), formación de esporocarpo, tamaño y color, y las características de germinación. Todas las características están descritas en las claves de clasificación de Schenck y Pérez (1990) y del Invam (2021), así como publicaciones científicas que dan soporte para la clasificación taxonómica de géneros y especies (Oehl & Sieverding, 2004; Oehl et al., 2008, 2010, 2011a, 2011b, 2011c, 2011d; Ortas & Ustuner, 2014; Palenzuela et al., 2008; Redecker et al., 2013; Sieverding & Oehl, 2006).

Una vez identificadas las comunidades a nivel de género o especie, se procedió a multiplicarlas con la metodología señalada anteriormente, para obtener los inóculos con los géneros o especies más frecuentemente aislados, para su evaluación en vivero y campo.

Adicionalmente, se calculó el índice de riqueza (*I*) para cada uno de los departamentos muestreados, con base en el índice de Margalef, que permite estimar la diversidad de los individuos de las diferentes especies con respecto al número total de individuos de las fincas analizadas en cada departamento:

$$I = \frac{(S - 1)}{Ln\, N}$$

Donde *S* es el número de especies encontradas, y *N*, el número total de individuos de todas las especies. Según este índice, valores por debajo de 2 son considerados de baja diversidad, y por encima de 5 se consideran sistemas con alta diversidad de especies (Valdez et al., 2018).

Para la determinación del porcentaje de colonización de raíz, se empleó la metodología de Phillips y Hayman (1970), la cual, mediante una tinción diferencial con azul de tripán, permite la observación en microscopio de las estructuras de los HFMA en el interior de las raíces de la planta hospedera.

Evaluación del efecto de la nutrición integral (química y biológica) en parcelas semicomerciales

Se establecieron en la HRS tres parcelas semicomerciales: en los municipios de Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá). El área total sembrada en cada municipio fue de 1,5 ha. Los tratamientos evaluados fueron: (T1) recomendación de la fertilización integral (química + HFMA), con fraccionamiento de la fertilización química a los dos y cuatro meses después de la siembra y reducción de la dosis del fertilizante químico al 50 % de la recomendada en el análisis de suelos; (T2) manejo agronómico convencional realizado por el agricultor, considerando tanto los productos como las dosis más frecuentemente usados en la región. La inoculación con HFMA se realizó en el momento de la siembra, aplicando en surcos un inóculo con 70 ± 10 esporas de HFMA por gramo de una mezcla de *Rhizophagus irregularis* y *Acaulospora mellea*. Este inóculo fue seleccionado en evaluaciones en vivero, ya que mostró un mejor comportamiento.

En cada municipio se evaluó el comportamiento de tres variedades de caña (CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11) liberadas por AGROSAVIA y distribuidas a los productores; ya que la RD 75-11 era la variedad con mayor difusión en la HRS, para este estudio se consideró como el testigo regional. Adicionalmente, se evaluó la variedad CC 01-1940 en Ocamonte y Chitaraque. El sistema de siembra empleado fue chorrillo sencillo, con una densidad de 8-12 yemas por metro lineal y una distancia entre surcos de 1,3 m, y la inoculación se realizó en el momento de la siembra con 200 kg/ha.

El esquema de fertilización química del manejo convencional del agricultor (T2) se realizó con una mezcla de 50 kg/ha de un producto comercial que contiene NPK (15-4-23) + 4 % de MgO + 2 % de S + 0,1 % de B + 0,1 % de Zn; 100 kg/ha de un producto comercial con NPK (12-24-12) + 2 % de MgO + 1 % de S + 0,04 % de B + 0,02 % de Zn, y 100 kg/ha de un producto con NPK (21-0-0) + 11 % de CaO + 7,5 % de MgO. Para la fertilización recomendada (T1), las dosis de fertilización se realizaron de forma diferencial,

de acuerdo con la variedad y el análisis de suelo de cada municipio. En la tabla 2.1 se presentan las dosis y los fertilizantes empleados. La distribución de cada una de las parcelas se realizó teniendo en cuenta los materiales bajo estudio y los tratamientos en forma aleatoria.

Tabla 2.1. Fuentes y dosis de la fertilización recomendada empleada en las parcelas semicomerciales

Variedad	CC 93-7711		CC 93-7510		RD 75-11		CC 01-1940	
Fuente (kg/ha)	Fertilización al 50% fraccionada (T2)							
	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds
0N – 0P – 60K	29	67	24	55	13	29	29	67
18N – 46P – 60K	33	—	33	—	33	—	33	—
24K – 19S	66	66	61	61	54	54	66	66
3N – 3,6Mg – 8S – 4Zn – 8B – 1,8Si	2	2	2	2	2	2	2	2
20Mn	8	8	6	6	6	6	8	8
3N – 6S – 15Zn – 0,5Cu – 2,5B	4	4	3	3	3	3	4	4
35Mg – 31Si	4	4	4	4	4	4	4	4

MDS: meses después de la siembra

Nota: Las dosis fueron para el 50 % de la fertilización + HFMA.

Fuente: Elaboración propia

Análisis económico de las fertilizaciones integral y convencional

Se realizó un seguimiento de los costos directos e indirectos de establecimiento y mantenimiento del cultivo de caña de azúcar para panela en los tres municipios: Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá). Los costos incluyeron mano de obra (jornales empleados en la preparación del lote, la siembra, la inoculación de HFMA, la fertilización, el control de malezas, el deshoje, los muestreos y la cosecha) e insumos (semillas, enmiendas, fertilizantes, HFMA y herbicidas).

Resultados

Diversidad de HFMA asociados al cultivo de la caña de azúcar para panela

Los resultados sobre la diversidad se presentan en la figura 2.2, donde se puede observar un valor de esporas de HFMA variable entre los departamentos; el número más alto se presentó en el departamento del Cauca, con 147 esporas/g de suelo; sin embargo, este departamento no tuvo la mayor riqueza de especies (2,6), de acuerdo con el índice de Margalef (Valdez et al., 2018): los mayores índices de riqueza se encontraron en los departamentos de Antioquia (4,8), Santander (4,7) y Norte de Santander (4,3). El bajo número de esporas en algunos departamentos pudo haber sido debido a las prácticas de manejo o a procesos de degradación de suelos como compactación, erosión y desbalance nutricional (figura 2.2). La presencia de esporas de HFMA en todas las muestras analizadas indica que existe un potencial de esporas nativas asociadas a suelos paneleros con capacidad para establecer la asociación planta-HFMA; sin embargo, es necesario realizar una inoculación para aumentar el número de esporas y garantizar, de esta forma, el establecimiento de la asociación en cultivos de caña de azúcar para panela y obtener los beneficios asociados a esta práctica en términos nutricionales.

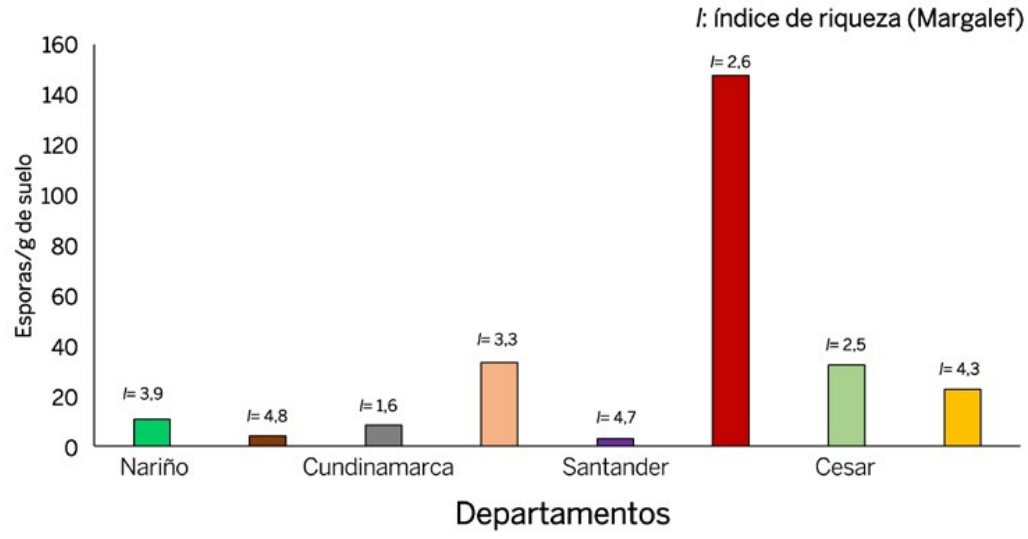


Figura 2.2. Número de esporas de HFMA/g de suelo y riqueza de especies (*I*) presentes en suelos cultivados con caña de azúcar para panela en diferentes departamentos de Colombia.

Fuente: Elaboración propia

De las muestras de suelo rizosférico del cultivo de caña en los diferentes departamentos, se identificaron 44 morfoespecies, pertenecientes a 6 familias y 12 géneros. En la figura 2.3 se presenta el listado de géneros y especies encontrados, y algunos ejemplos de esporas.

Familias y morfoespecies					
Acaulosporaceae	**Glomeraceae**	**Diversisporaceae**	**Entrophosporaceae**	**Gigasporaceae**	**Racocetraceae**
Acaulospora sp.1	*Septoglomus constrictum*	*Diversispora* sp.1	*Claroideoglomus* sp.1	*Gigaspora* sp.1	*Cetraspora* sp.1
Acaulospora sp.2	*Septoglomus* sp.1	*Diversispora spurca*	*Claroideoglomus* sp.2		
Acaulospora sp.3	*Simiglomus hoi*		*Entrophospora infrequens*		
Acaulospora mellea	*Glomus macrocarpum*		*Entrophospora* sp.1		
Acaulospora denticulata	*Glomus microcarpum*				
Acaulospora scrobiculata	*Glomus brohultii*				
Acaulospora reducta	*Glomus oureum*				
Kuklospora colombiana	*Glomus trufemii*				
	Glomus sinuosum				
	Glomus globiferum				
	Glomus sp.1				
	Glomus sp.2				
	Funneliformis sp.1				
	Funneliformis sp.2				
	Funneliformis geosporum				
	Rhizoglomus sp.1				
	Rhizoglomus intraradices				
	Rhizoglomus fasciculatum				
	Rhizoglomus manihotis				

Fuente: Elaboración propia

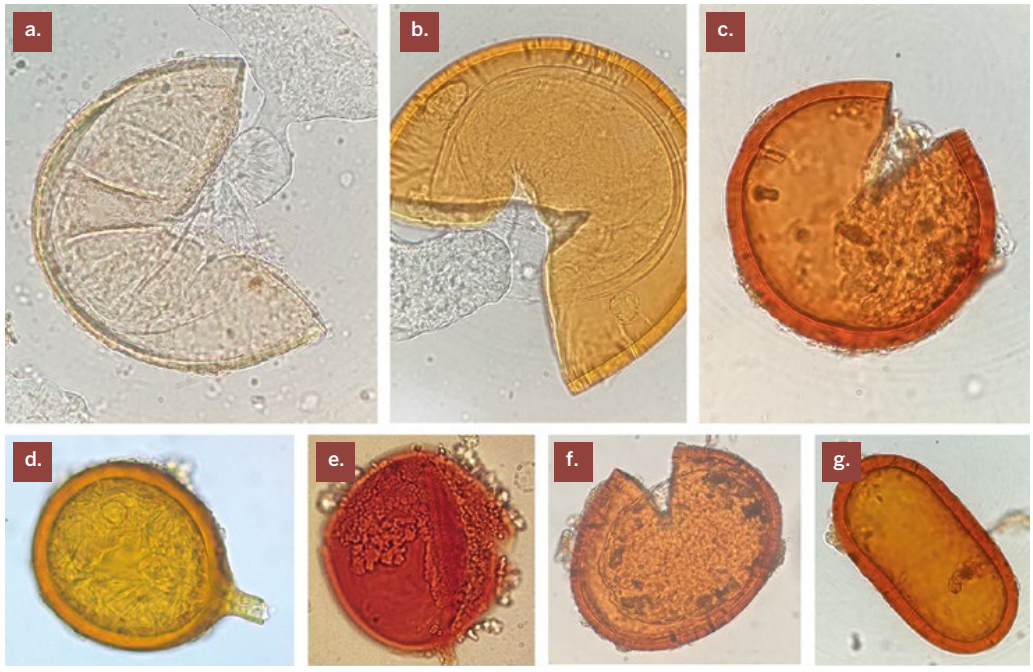


Figura 2.3. Diversidad de esporas de HFMA encontradas en suelos paneleros. a. *Acaulospora mellea*; b. *Acaulospora* sp.; c. *Claroideoglomus etunicatum* sp.2; d. *Rhizoglomus fasciculatum*; e. *Glomus* sp.1; f. *Entrophospora* sp.1; g. *Glomus* trufemii.

Fotos: Wilmar Alexander Wilches Ortiz

La riqueza de esporas y la diversidad de morfoespecies en las diferentes regiones del país (figura 2.3) reflejan el potencial de esta especie vegetal para asociarse de forma natural a HFMA, posiblemente desde la introducción de la caña de azúcar en el país, en ambientes específicos, aunque todas las familias reportadas de HFMA tienen presencia en toda la región, lo que posiciona al cultivo de caña como un banco de reserva de estos microrganismos y reafirma la capacidad de estos de adaptarse a cambios dinámicos del ambiente para asociarse con la caña (Hijri et al., 2006; Oehl et al., 2004; Moebius-Clune et al., 2013). Agronómicamente, la alta diversidad identificada representa el potencial que tienen los ecosistemas andinos para el establecimiento de asociaciones

simbióticas, ya que, a pesar de ser el cultivo de la caña un agroecosistema con un uso intensivo, la diversidad de HFMA nativos es relativamente alta en algunos departamentos, pese a que diferentes autores han reportado la reducción en la diversidad de HFMA en sistemas agrícolas (Cowden & Peterson, 2009; Jasper et al., 1987; Sieverding et al., 1991).

Efecto de la nutrición integral (química y biológica) en la producción de caña en parcelas semicomerciales en la HRS

A continuación, se describen los resultados relacionados con la producción de caña y panela en los tres municipios de la HRS (figura 2.4). En el municipio de Ocamonte, Santander, se logró un incremento en la producción de caña del 51 % para la variedad CC 93-7711 y del 61 % para la variedad CC 01-1940 (figura 2.4a), mientras que los incrementos obtenidos en producción de panela fueron del 54 % para la variedad CC 93-7711 y del 24 % para la variedad CC 01-1940 (figura 2.4b). En el municipio de Chitaraque, Boyacá, para la variedad CC 01-1940, se alcanzaron incrementos del 25 % en producción de caña (t/ha) (figura 2.4c) y del 19 % en producción de panela (t/ha) (figura 2.4d). En Oiba, Santander, se lograron incrementos en producción de caña del 28 % para la variedad CC 93-7510 (figura 2.4e) y en producción de panela del 32 %, 35 % y 30 % para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente (figura 2.4f).

En cuanto a la calidad de la panela (información no mostrada), no se encontraron efectos adversos por la implementación de la fertilización integral. Debido a que en la mayoría de las variedades y ambientes (municipios) la recomendación presenta resultados

favorables en términos de rendimiento de caña y panela, es pertinente proponer una recomendación de uso de la fertilización integral, por sus beneficios en los ingresos de los productores, debido al incremento en rendimiento, la reducción en costos de fertilización (un 50 % menos de fertilizantes de síntesis química) y la reducción en impactos ambientales generados por malas prácticas de fertilización de cultivos.

Análisis económico

En la tabla 2.2 se presenta la estructura de costos directos e indirectos de la producción de caña. Se tomó un promedio de los tres municipios de la HRS (Ocamonte, Oiba y Chitaraque) para cada uno de los tratamientos. En la figura 2.5 se presentan los costos por tonelada de panela y la diferencia porcentual entre los dos tratamientos evaluados. En el caso de Ocamonte, el tratamiento de fertilización (T1) presentó costos superiores del 40 %, y del 12 % para las variedades CC 93-7711 y CC 01-1940, respectivamente, mientras que para las variedades CC 93-7510 y RD 75-11 se presentó una reducción del 19 % y del 5 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento convencional (T2).

Tabla 2.2. Estructura de costos de producción con el tratamiento del agricultor (T2) y con fertilización integral (T1)

Tipos de costos y actividades	Valor total agricultor (COP/ha)	Valor total fertilización integral (COP/ha)
Costos directos		
Preparación del suelo (jornales)	886.000	886.000
Mano de obra	4.581.000	4.692.000
Semilla (cangres)	3.600.000	3.600.000
Fertilizantes	4.824.150	2.537.400
Micorrizas	0	235.000
Otros (equipos y herramientas)	588.000	588.000

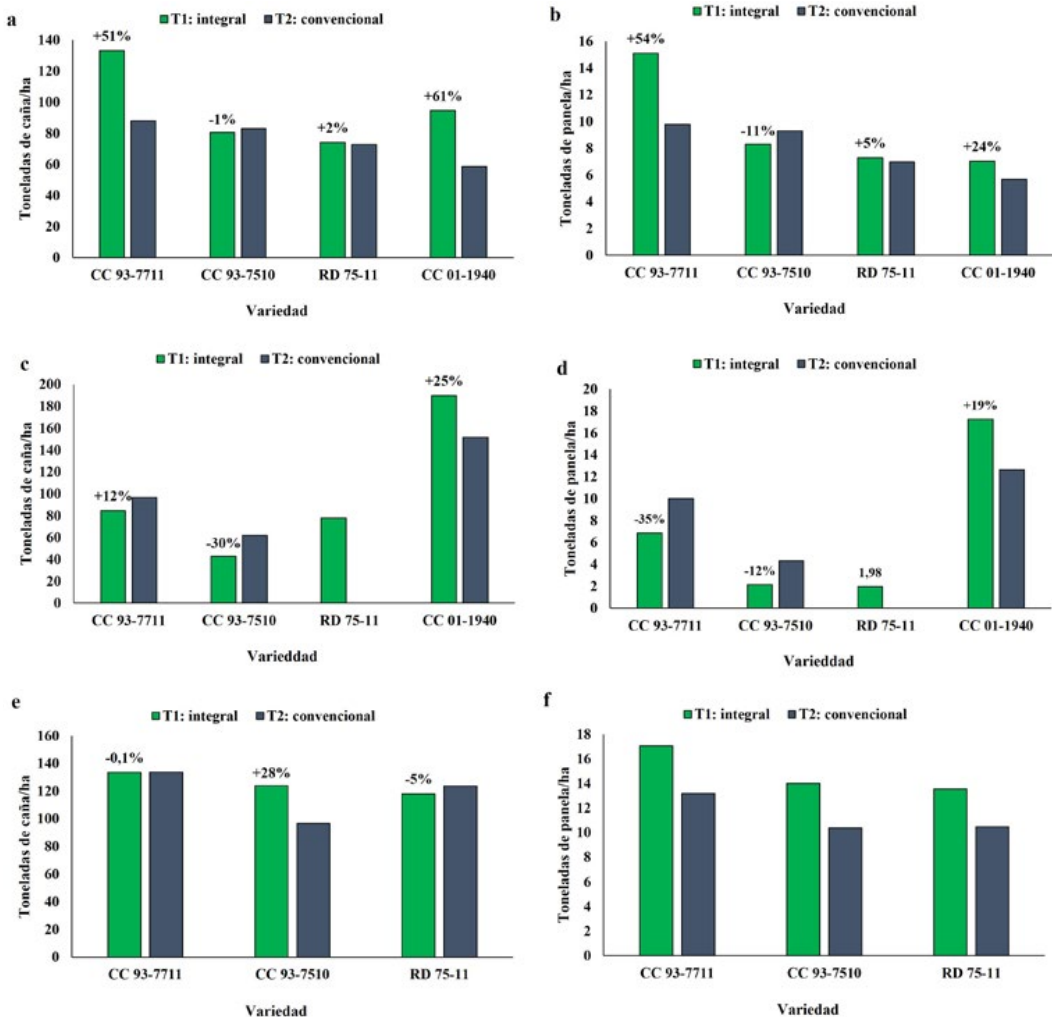


Figura 2.4. Validación de la fertilización integral en parcelas semicomerciales establecidas en los municipios de Ocamonte, Chitaraque y Oiba sobre la producción de caña y panela (t/ha). a y b. Ocamonte; c y d. Chitaraque; e y f. Oiba.

Nota: En Chitaraque, para la variedad RD 75-11, no se presentan datos de rendimiento en caña y panela para el tratamiento T2, ya que el productor cosechó anticipadamente y no tomó la información requerida.

Fuente: Elaboración propia

Tipos de costos y actividades	Valor total agricultor (COP/ha)	Valor total fertilización integral (COP/ha)
Corte y alce	6.232.000	6.232.000
Subtotal de costos directos	*20.711.150*	*18.770.400*
Costos indirectos		
Arriendo	1.077.000	1.077.000
Costos totales de cultivo	**21.788.150**	**19.847.400**

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Chitaraque, solamente para la variedad CC 01-1940, el tratamiento de fertilización integral presentó un costo un 25 % más alto que el tratamiento convencional; para las otras variedades, CC 93-7711 y CC 93-7510, el costo fue un 38 % y un 54 % menor que el tratamiento convencional. En el caso de Oiba, el tratamiento de fertilización integral presentó incrementos del 18 %, 22 % y 17 % para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente, con relación al tratamiento convencional. Lo anterior se relaciona con los resultados de rendimiento de panela obtenidos, los cuales fueron superiores para la fertilización integral en esta misma localidad.

Para Ocamonte, se observaron reducciones en los costos de producción de panela del 19 % y 5 % por el uso de la recomendación de fertilización integral para las variedades CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente, con relación a la fertilización convencional. Para la variedad CC 01-1940, los costos de producción de panela fueron mayores, debido a que el rendimiento de panela fue significativamente superior. Para el caso de Chitaraque, la reducción en los costos de producción de panela con el tratamiento de fertilización integral fue del 38 % y 54 % en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510, respectivamente, y de la variedad RD 75-11 no se pudo hacer la evaluación del tratamiento de fertilización integral por cosecha anticipada por parte del agricultor.

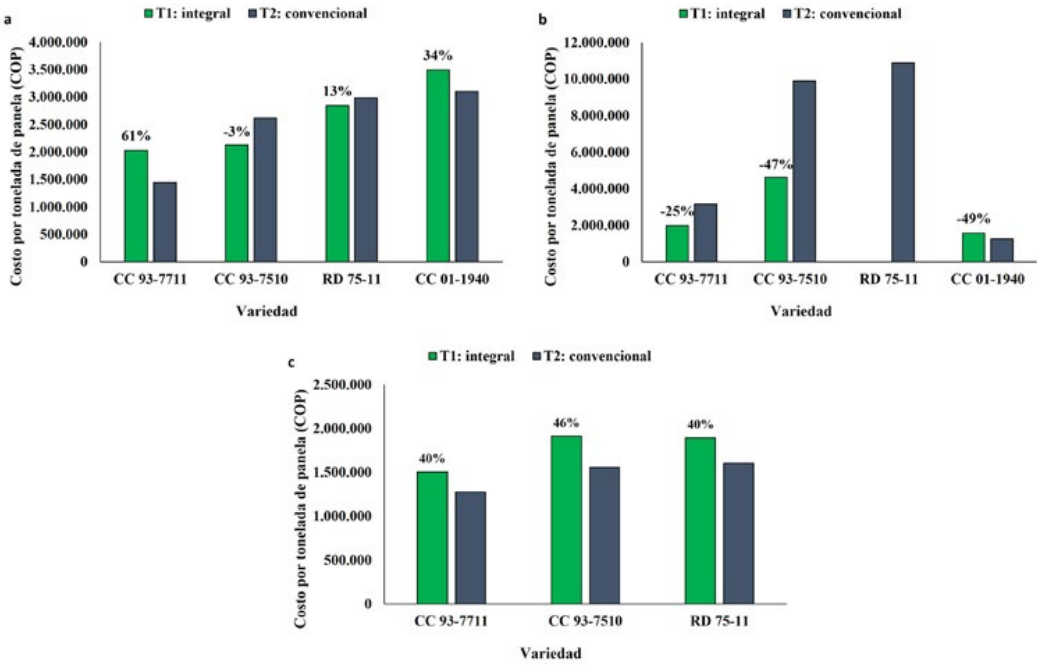


Figura 2.5. Costos por tonelada de panela para las variedades y los municipios estudiados con dos tratamientos de fertilización: integral y convencional. a. Ocamonte; b. Chitaraque; c. Oiba.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En los sistemas de producción de caña de azúcar para panela se encuentra una asociación natural de HFMA con plantas de caña que difiere dependiendo de las condiciones edafoclimáticas y del manejo del cultivo en cada municipio. La diversidad de HFMA en las zonas productoras de caña para panela se encuentra en niveles relativamente altos en los departamentos de Antioquia, Santander y Norte de Santander, y en niveles bajos en el departamento de Cundinamarca, debido a las prácticas de manejo o a los procesos de degradación de suelos. A nivel semicomercial, se pudo evidenciar el beneficio del uso de la fertilización integral, considerando el fraccionamiento y la reducción en un 50 % de la dosis de fertilizantes de síntesis química y el uso de HFMA. Es

así como en el municipio de Ocamonte, Santander, se obtuvieron incrementos del 54 % y 24 % en la producción de panela para las variedades CC 93-7711 y CC 01-1940, respectivamente; en Chitaraque, Boyacá, para la variedad CC 01-1940, se alcanzaron incrementos del 25 % en la producción de caña (t/ha) y del 19 % en la producción de panela (t/ha), y en Oiba, Santander, se lograron incrementos en producción de caña del 28 % para la variedad CC 93-7510 y en producción de panela del 32 %, 35 % y 30 % para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente. El uso de HFMA es una estrategia que permite incrementar los niveles de competitividad y sostenibilidad del sistema de producción, sin afectar la calidad de la panela y mitigando el impacto ambiental negativo de la baja eficiencia en el uso de fertilizantes de síntesis química.

Agradecimientos

El proyecto "Optimización de la fertilización del cultivo de caña panelera a partir de alternativas de nutrición integral y balance de nutrientes" se ha podido ejecutar gracias a la financiación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y al aporte de AGROSAVIA, que brindó el recurso humano y la infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto. Igualmente, el equipo de trabajo quiere agradecer a los productores directamente relacionados con las fincas donde se desarrollaron las evaluaciones, y a quienes participaron en los eventos de capacitación y vinculación de tecnología.

Referencias

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, artículo 1068. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Campo, S., Martín-Cardoso, H., Olivé, M., Pla, E., Catala-Forner, M., Martínez-Eixarch, M., & San Segundo, B. (2020). Effect of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi on growth, productivity and blast resistance in rice. *Rice*, *13*, artículo 42. https://doi.org/10.1186/s12284-020-00402-7

Ceballos, I., Mateus, I. D., Peña, R., Peña-Quemba, D. C., Robbins, C., Ordoñez, Y. M., Rosikiewicz, P., Rojas, E. C., Thuita, M., Mlay, D. P., Masso, C., Vanlauwe, B., Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2019). Using variation in arbuscular mycorrhizal fungi to drive the productivity of the food security crop cassava. *BioRxiv*, artículo 830547. https://doi.org/10.1101/830547

Ceballos, I., Ruiz, M., Fernández, C., Peña, R., Rodríguez, A., & Sanders, I. R. (2013). The *in vitro* mass-produced model mycorrhizal fungus, *Rhizophagus irregularis*, significantly increases yields of the globally important food security crop cassava. *Plos One*, *8*(8), artículo e70633. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070633

Chi, L., Mendoza-Vega, J., Huerta, E., & Álvarez-Solís, J. D. (2017). Effect of long-term sugarcane (*Saccharum* spp.) cultivation on chemical and physical properties of soils in Belize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *48*(7), 741-755. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1254794

Cowden, C. C., & Peterson, C. J. (2009). A multi-mutualist simulation: Applying biological market models to diverse mycorrhizal communities. *Ecological Modelling*, *220*(12), 1.522-1.533. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.03.028

Elliott, A. J., Daniell, T. J., Cameron, D. D., & Field, K. J. (2021). A commercial arbuscular mycorrhizal inoculum increases root colonization across wheat cultivars but does not increase assimilation of mycorrhiza-acquired nutrients. *Plants*, *People*, *Planet*, *3*(5), 588-599. https://doi.org/10.1002/ppp3.10094

Frew, A. (2021). Contrasting effects of commercial and native arbuscular mycorrhizal fungal inoculants on plant biomass allocation, nutrients, and phenolics. *Plants*, *People*, *Planet*, *3*(5), 536-540. https://doi.org/ https://doi.org/10.1002/ppp3.10128

Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, *46*(2), 235-244. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0

González Chavarro, F., Cabezas Gutiérrez, M., Ramírez-Gómez, M., & Ramírez Durán, J. (2018). Curvas de absorción de macronutrientes en tres variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) para panela, en la Hoya del Río Suárez. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, *21*(2), 395-404. https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.995

Hause, B., & Fester, T. (2005). Molecular and cell biology of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Planta*, *221*(2), 184-196. http://dx.doi.org/10.1007/s00425-004-1436-x

Hijri, I., Sýkorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Maeder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, *15*(8), 2.277-2.289. https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2006.02921.x

Hijri, M. (2016). Analysis of a large dataset of mycorrhiza inoculation field trials on potato shows highly significant increases in yield. *Mycorrhiza*, *26*(3), 209-214. https://doi.org/10.1007/s00572-015-0661-4

Hussain, S., Anwar-ul-Haq, M., Hussain, S., Akram, Z., Afzal, M., & Shabbir, I. (2017). Best suited timing schedule of inorganic NPK fertilizers and its effect on qualitative and quantitative attributes of spring sown sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *16*(1), 66-71. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.02.004

Invam. (2021). *Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)*. https://invam.ku.edu/

Jasper, D. A., Robson, A. D., & Abbott, L. K. (1987). The effect of surface mining on the infectivity of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Australian Journal of Botany*, *35*(6), 641-652. https://doi.org/10.1071/BT9870641

Mamani de Marchese, A., & Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, *38*(1). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S2314-369X2018000100001&script=sci_arttext&tlng=es

Moebius-Clune, D. J., Moebius-Clune, B. N., Van Es, H. M., & Pawlowska, T. E. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with a single agronomic plant host across the landscape: Community differentiation along a soil textural gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, *64*, 191-199. http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.014

Morton, J. B., & Benny, G. L. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): A new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*, *37*, 471-491. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19912307931

Mthimkhulu, S., Podwojewski, P., Hughes, J., Titshall, L., & Van Antwerpen, R. (2016). The effect of 72 years of sugarcane residues and fertilizer management on soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *225*, 54-61. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.002

Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, *32*(2), 429-448. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005

Oehl, F., Alves a Silva, G., Goto, B. T., Costa Maia, L., & Sieverding, E. (2011a). Glomeromycota: Two new classes and a new order. *Mycotaxon*, *116*(1), 365-379. https://doi.org/10.5248/116.365

Oehl, F., Da Silva, D. K. A., Maia, L. C., De Sousa, N. M. F., Vieira, H. E. E., & Da Silva, G. A. (2011b). *Orbispora* gen. nov., ancestral in the *Scutellosporaceae* (Glomeromycetes). *Mycotaxon*, *116*(1), 161-169. http://dx.doi.org/10.5248/116.161

Oehl, F., Da Silva, G. A., Goto, B. T., & Sieverding, E. (2011c). *Glomeromycota*: Three new genera and glomoid species reorganized. *Mycotaxon*, *116*(1), 75-120. https://doi.org/10.5248/116.75

Oehl, F., Da Silva, G. A., Sánchez-Castro, I., Goto, B. T., Maia, L. C., Vieira, H. E. E., Barea, J.-M., Sieverding, E., & Palenzuela, J. (2011d). Revision of *Glomeromycetes* with entrophosporoid and glomoid spore formation with three new genera. *Mycotaxon*, *117*(1), 297-316. https://doi.org/10.5248/117.297

Oehl, F., De Souza, F. A., & Sieverding, E. (2008). Revision of Scutellospora and description of five new genera and three new families in the arbuscular mycorrhiza-forming Glomeromycetes. *Mycotaxon*, *106*(1), 311-360.

Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., Van der Heijden, M., & Sieverding, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil*

Biology and Biochemistry, *42*(5), 724-738. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.006

Oehl, F., & Sieverding, E. (2004). *Pacispora*, a new vesicular arbuscular mycorrhizal fungal genus in the Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany*, *78*, 72-82. https://www.researchgate.net/publication/279937627_Pacispora_a_new_vesicular_arbuscular_mycorrhizal_fungal_genus_in_the_Glomeromycetes

Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, *138*(4), 574-583. https://doi.org/10.1007/s00442-003-1458-2

Ortas, I., & Ustuner, O. (2014). Determination of different growth media and various mycorrhizae species on citrus growth and nutrient uptake. *Scientia Horticulturae*, *166*, 84-90. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.014

Palenzuela, J., Ferrol, N., Boller, T., Azcón-Aguilar, C., & Oehl, F. (2008). *Otospora bareai*, a new fungal species in the Glomeromycetes from a dolomitic shrub land in Sierra de Baza National Park (Granada, Spain). *Mycologia*, *100*(2), 296-305. https://doi.org/10.3852/mycologia.100.2.296

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, *55*(1), 158-161. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *15*(2), 183-195. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-87062014000200005

Ramírez Gómez, M., Roveda Hoyos, G., Bonilla Buitrago, R., Cabra Julio, L., Peñaranda Rolón, A., López Jiménez, M., Serralde, D. P., Tamayo Vélez, Á., Navas Ríos, G. E., & Díaz Diez, C. A. (2008). *Uso y manejo de biofertilizantes en el cultivo de la uchuva.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Ramírez Gómez, M. M., Peñaranda Rolon, A. M., Pérez Moncada, U. A., & Serralde, D. P. (2018). Biofertilización con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en especies forestales en vivero.

Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, *16*(2), 15-25. https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.1162

Ramírez Gómez, M. M., Peñaranda Rolón, A. M., Serralde Ordóñez, D. P., & Pérez Moncada, U. A. (2020). *Producción y aplicación de hongos formadores de micorrizas en vivero de caña para panela. Manual práctico de uso.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403732

Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., & Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, *23*(7), 515-531. https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y

Schenck, N. C., & Pérez, Y. (1990). *Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi* (vol. 286). Synergistic Publications.

Sediyama, M. A. N., Santos, M. R., Vidigal, S. M., Santos, I. C., & Salgado, L. T. (2010). Ocorrência de plantas daninhas no cultivo de beterraba com cobertura morta e adubação orgânica. *Planta Daninha*, *28*(4), 717-725.

Serralde, A. M., & Ramírez, M. M. (2004). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *5*(1), 31-40. https://doi.org/10.21930/rcta.vol5_num1_art:22

Sieverding, E., Friedrichsen, J., & Suden, W. (1991). *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems.* Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit.

Sieverding, E., & Oehl, F. (2006). Revision of *Entrophospora* and description of *Kuklospora* and *Intraspora*, two new genera in the arbuscular mycorrhizal Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *80*(1), 69-81. https://www.researchgate.net/publication/284793137_Revision_of_Entrophospora_and_description_of_Kuklospora_and_Intraspora_two_new_genera_in_the_arbuscular_mycorrhizal_Glomeromycetes

Smith, S. E., & Read, D. (2008). *The mycorrhizal symbiosis*. Academic Press.

Valdez, C. G., Guzmán, M. A., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., & Rocha, A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, *66*(4), 1.674-1.682.

Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolon, A. M., & Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, *37*(2), 175-184. https://doi.org/10.28940/tl.v37i2.481

Capítulo 3

Barrenadores del tallo asociados al cultivo de caña de azúcar para panela en Colombia

Nancy del Carmen Barreto-Triana, Yuly Paola Sandoval-Cáceres, Pablo Andrés Osorio-Mejía y Zaida Xiomara Sarmiento-Naizaque

Resumen

En Colombia, el complejo de barrenadores del género *Diatraea* fue declarado plaga de control oficial por el ICA en 2017. Por su importancia para la agroindustria panelera, AGROSAVIA adelantó estudios en Antioquia, Boyacá, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Nariño y Santander con el propósito de determinar las especies de barrenadores, establecer su incidencia e identificar la presencia de parasitoides asociados. Se determinaron las especies *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella*. Con menor frecuencia, se encontraron el barrenador listado *Eoreuma insuastii*, nueva especie; el barrenador menor *Blastobasis graminea*, y el barrenador de la guadua *Myelobia smerintha* (primer registro para caña de azúcar). Además, se encontró una proporción importante de larvas de barrenadores parasitadas por moscas: *Billaea claripalpis* (6,5 %) y *Genea jaynesi* (7,5 %), y por avispas: *Cotesia flavipes* (11 %) y *Alabagrus* spp. (0,8 %). Asimismo, se generaron recomendaciones para el manejo de los barrenadores mediante la liberación y conservación de parasitoides.

Palabras clave: *Diatraea*, *Eoreuma*, *Blastobasis*, *Myelobia*, parasitoides

Introducción

El cultivo de caña de azúcar es afectado por diferentes insectos plaga en Colombia, de los cuales el complejo de barrenadores del género *Diatraea* es el de mayor impacto económico por el daño que causa, y desde 2017 fue declarado plaga de control oficial debido a su alta incidencia en el país (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2017). En el continente americano, según Solis y Metz (2016), se reporta la presencia de 41 especies, siendo la más ampliamente distribuida *D. saccharalis* (Fabricius, 1794).

En Colombia, en el valle geográfico del río Cauca, se han reportado las especies *D. busckella* Dyar & Heinrich, 1927; *D. indigenella* Dyar & Heinrich, 1927; *D. saccharalis* (Fabricius, 1794), y *D. tabernella* Dyar, 1911, afectando cultivos de caña de azúcar (Vargas et al., 2013; Vargas et al., 2015). Barrera et al. (2017) reportaron como nuevos registros para el país las especies *D. albicrinella* Box, 1931, y *D. centrella* (Möschler, 1883), encontradas en Caquetá.

Según Pinto (1990), el impacto económico del complejo *Diatraea* en caña para la agroindustria panelera se estimó en la pérdida de 105,4 kg de panela por hectárea por cada unidad porcentual de daño causado por el barrenador. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) declaró, en la Resolución 4347 de 2014, el "estado de emergencia fitosanitaria en los departamentos de Boyacá y Santander por las altas incidencias de los barrenadores del tallo (*Diatraea* spp.)" en los cultivos de caña de azúcar para panela, al estimar valores del 54 % al 64 % de infestación y del 7 % al 9,8 % de intensidad de infestación (ICA, 2014). Posteriormente, en la Resolución 17848 de 2017, declaró el control oficial de los barrenadores *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella*, como medida para incrementar los métodos de control de la plaga, con el uso de parasitoides de huevos y larvas (ICA, 2017).

Otros barrenadores que se presentan con menor frecuencia en este cultivo son el barrenador listado *Eoreuma insuastii* Solis &

Osorio-Mejía (Lepidoptera: Crambidae), nueva especie para la ciencia, encontrada en municipios productores de caña de azúcar para panela de Boyacá y Santander (Hoya del Río Suárez) causando daño similar al de *Diatraea* spp. en los tallos de la caña (Solis et al., 2020); el barrenador menor *Blastobasis graminea* Adamski, 1999 (Lepidoptera: Blastobasidae), que ocasiona daño localizado en los nudos y se ha reportado en los departamentos de Boyacá, Cauca, Cesar, Nariño, Santander y Valle del Cauca (Bustillo Pardey, 2012; Sandoval et al., 2015); y *Myelobia smerintha* (Hübner, 1821) (Lepidoptera: Pyralidae), barrenador de diversas plantas pertenecientes a la familia Poaceae, que se encontró en cultivos de caña de azúcar para panela en Cundinamarca (Sandoval-Cáceres et al., 2017).

El manejo integrado del complejo de barrenadores se basa en el uso de controladores biológicos, como *Trichogramma exiguum*, parasitoide de huevos; *Cotesia flavipes*, *Billaea claripalpis* y *Lydella minense*, parasitoides de larvas comercializados en Colombia (Bustillo Pardey, 2012; ICA, 2017); y la mosca nativa *Genea jaynesi*, que también parasita larvas y se encuentra presente en los sistemas productivos de caña de azúcar (Bustillo Pardey, 2012) y en fincas productoras de panela (Sarmiento-Naizaque et al., 2021).

El objetivo de este capítulo es actualizar la distribución de las especies de barrenadores del tallo en zonas productoras de caña de azúcar para panela del país, así como describir brevemente sus principales características biológicas y morfológicas, el daño que ocasionan, sus enemigos naturales asociados y algunas recomendaciones para su manejo integrado.

Metodología

Área de estudio

Durante 2014 se realizaron muestreos en dos épocas del año, ambas entre marzo y octubre, en municipios de producción

panelera de los departamentos de Antioquia (Campamento, Frontino, San Roque y Yolombó), Boyacá (Chitaraque, Moniquirá, San José de Pare, Santana y Togüí), Cundinamarca (Nimaima, Nocaima y Villeta), Nariño (Ancuya y Sandoná) y Santander (Güepsa, Suaita y Vélez). Posteriormente, en 2019, se visitaron los departamentos de Cauca (Cajibío, El Tambo y Santander de Quilichao) y Cesar (Agustín Codazzi, González y Valledupar-Atanquez). Entre 2015 y 2017 se realizó el estudio de fluctuación poblacional de *Diatraea* spp. y los parasitoides asociados en la Hoya del Río Suárez (Boyacá y Santander).

Muestreo en campo

Los muestreos se efectuaron en lotes cultivados con caña de azúcar para panela de cuatro o menos meses, seleccionando tallos con síntomas de corazón muerto (marchitez de la yema terminal), y en lotes con cañas maduras, mayores de quince meses. Mediante un esfuerzo de muestreo de dos horas hombre por lote, se recolectaron cerca de veinte larvas de barrenador por finca y se trasladaron a laboratorio.

Seguimiento en laboratorio

En el laboratorio de entomología del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, se llevó a cabo el seguimiento al material recolectado en campo y el estudio del ciclo de vida de *Diatraea* spp. en condiciones controladas (25 ± 2 °C de temperatura; 60 ± 10 % de humedad relativa; fotoperiodo de 12 horas de luz/12 horas de oscuridad).

Seguimiento al material recolectado en campo: para el seguimiento e identificación de las especies de barrenadores y de los enemigos naturales asociados provenientes de los muestreos, se individualizaron las larvas y se criaron en dieta artificial elaborada con trigo, soya, azúcar y vitaminas (Araújo et al., 1985; Hensley & Hammond, 1968), hasta la obtención de adultos de la plaga o sus parasitoides.

La determinación de las especies de barrenadores se realizó por medio de la extracción del aparato genital de las polillas macho, siguiendo las claves propuestas por Bleszynski (1969) y por Solis y Metz (2016), y se depositaron en la Colección Taxonómica Nacional de Insectos Luis María Murillo (CTNI), del Centro de Investigación Tibaitatá.

Los parasitoides obtenidos se preservaron en etanol al 75 %, etiquetados según los protocolos de la CTNI, y algunos se montaron en alfiler. La determinación taxonómica se efectuó mediante las claves de Wharton et al. (1993), Muirhead et al. (2008), Brown et al. (2010), Guimaraes (1977) y Nunez y Couri (2011).

Ciclo de vida de los barrenadores del género *Diatraea*: en laboratorio se estudió la duración y viabilidad de los estados de desarrollo de cada especie, mediante la dieta artificial mencionada, siguiendo la metodología de Parra (2021). Las crías se iniciaron con posturas provenientes de Cenicaña y AGROSAVIA.

Resultados y discusión

El seguimiento al material biológico proveniente de los siete departamentos permitió establecer la presencia de los barrenadores *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae), *E. insuastii* Solis & Osorio-Mejía (Lepidoptera: Crambidae) y *M. smerintha* (Hübner, 1821) (Lepidoptera: Pyralidae) en las zonas muestreadas.

Distribución del complejo de barrenadores del género *Diatraea* (Lepidoptera: Crambidae)

La determinación de especies del barrenador de acuerdo con la morfología del aparato genital de los machos permitió establecer la presencia de cuatro especies en zonas productoras de caña de azúcar para panela en el país: *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella* (figura 3.1). Inicialmente, se consideró

la presencia de la especie *D. rosa*, pero en 2022 la especialista en Crambidae Alma Solís determinó que correspondía a *D. busckella*.

La especie *D. busckella* se registró en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cauca, Cesar, Cundinamarca y Santander. Por su parte, *D. saccharalis* se identificó en Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Santander. A su vez, *D. indigenella* fue determinada para Cauca, Cesar y Nariño. Y *D. tabernella* se encontró en Antioquia y Cundinamarca.

Las especies *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella* también están presentes en el valle geográfico del río Cauca (Vargas et al., 2013; Vargas et al., 2015). Barrera et al. (2017) lograron establecer la presencia de las especies *D. albicrinella* Box, 1931, y *D. centrella* (Möschler, 1883) como nuevos registros para Colombia, basados en estudios moleculares de especímenes recolectados en el departamento de Caquetá, además de una especie sin reconocer aún con cercanía genética a *D. crambidoides* (Grote, 1880).

Este complejo de barrenadores constituye la principal plaga del cultivo de caña de azúcar debido al daño que ocasionan sus larvas al barrenar el interior de los tallos de manera longitudinal, lo que reduce la acumulación de biomasa y facilita la infección por patógenos. Se presentan durante todo el ciclo de cultivo, y en cañas jóvenes de dos a seis meses de edad, ocasionan la muerte de la yema apical, síntoma conocido como "corazón muerto", mientras que en caña madura el daño se detecta por la presencia externa de "aserrín" en los entrenudos y alrededor de la base de las hojas. El nivel de daño en tallos maduros se expresa en términos de porcentaje de intensidad de infestación (% I. I.) y se cuantifica mediante la relación del número de entrenudos afectados sobre el total de entrenudos evaluados (en caña para panela se evalúan 20 tallos por hectárea y se tolera hasta un 4 % de I. I., mientras que en la producción de azúcar se muestrean 100 tallos y se busca mantener la I. I. por debajo del 4 %) (Bustillo Pardey, 2012; ICA, 2014; Vargas et al., 2015). Los barrenadores *Diatraea* spp. afectan

a gramíneas como caña de azúcar, maíz, arroz, sorgo y pastos nativos (Solis & Metz, 2016).

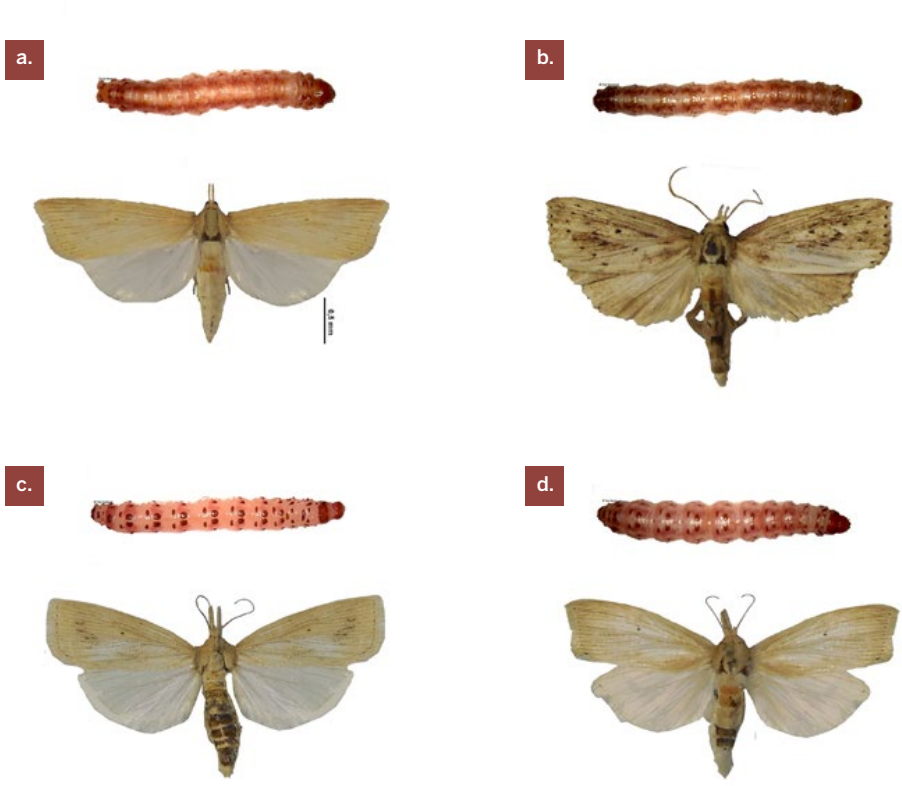


Figura 3.1. Larvas y adultos de las especies del barrenador halladas. a. *D. saccharalis*; b. *D. indigenella*; c. *D. tabernella*; d. *D. busckella*.

Fotos: Yuly Paola Sandoval-Cáceres

Biología del complejo de barrenadores del género *Diatraea* en dieta artificial

La duración del ciclo de vida de huevo a adulto de los barrenadores *Diatraea* en dieta artificial y en condiciones controladas de laboratorio fue mayor para *D. busckella*, con 77 días, seguida de *D. indigenella*, con 74; *D. tabernella*, con 56, y *D. saccharalis*, con 42 (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Duración y supervivencia de los estados de desarrollo de las cuatro especies del género *Diatraea* criadas en dieta artificial en condiciones de laboratorio (25 ± 2 °C; 60 ± 10 % de humedad relativa; fotoperiodo: 12/12)

Especie	Número de individuos	Duración (días)					Supervivencia (%)		Relación entre sexos
		Huevo	Larva	Pupa	Adulto	Huevo a adulto	Larva	Pupa	
D. saccharalis	100	6,1 ± 0,1	27,5 ± 0,4	8,7 ± 0,2	6,9 ± 0,2	42,1 ± 0,4	90	81	1,0 ♂:1♀
D. indigenella	74	8,6 ± 0,1	53,5 ± 0,5	13,3 ± 0,2	4,8 ± 0,2	74,7 ± 0,6	92	94	0,3 ♂:1♀
D. tabernella	88	10,5 ± 0,1	35,4 ± 0,6	9,8 ± 0,1	6,3 ± 0,3	56,0 ± 0,6	30	96	2,2 ♂:1♀
D. busckella	30	10,6 ± 0,3	49,7 ± 2,8	12,6 ± 2,3	4,9 ± 0,3	77,8 ± 1,4	34	90	1,3♂ :1♀

Fuente: Elaboración propia

La duración del ciclo obtenido para *D. saccharalis* fue similar a los hallazgos de Gómez y Vargas (2014), Pérez y Martínez (2011), Pastrana et al. (1993) y Linares (1987). *D. saccharalis* suele presentar entre cuatro y cinco instares larvales, mientras que *D. indigenella* puede tener seis instares o más, lo que podría explicar las variaciones en la duración del ciclo de vida entre las especies. Pastrana et al. (1993) calcularon una duración de huevo a adulto de 60 días para *D. indigenella* mediante la dieta artificial de Lastra y Gómez (1987), mientras que en el presente estudio fue de 74 días. Esta diferencia, además de lo expuesto anteriormente, podría deberse a condiciones de laboratorio (30 °C y 80 % de humedad relativa) diferentes a las del presente trabajo.

Las larvas de *D. saccharalis* y *D. indigenella* presentaron una supervivencia superior al 80 %, lo que indica que la dieta artificial utilizada es favorable para la cría de estas dos especies, si se compara con los resultados de Gómez y Vargas (2014), quienes reportaron un 73 % de supervivencia para *D. saccharalis* y un 26 % para *D. indigenella* utilizando una dieta artificial con una composición diferente a la evaluada en el presente estudio. En contraste, las larvas de *D. tabernella* y *D. busckella* presentaron menor supervivencia, lo que indica que la dieta artificial es menos apropiada para este par de especies. Con respecto a la relación de sexos macho/hembra, usualmente se considera favorable para el incremento poblacional una proporción de hembras ligeramente mayor. No obstante, para *D. tabernella* los machos duplicaron a las hembras, aunque, de acuerdo con Medina Pereyra et al. (2016), una mayor proporción de machos permite un mayor número de hembras copuladas.

Enemigos naturales de los barrenadores de caña para panela

Los parasitoides encontrados correspondieron a avispas de la familia Braconidae: *Alabagrus* spp. y *C. flavipes* Cameron, 1891, y a moscas de la familia Tachinidae: *B. claripalpis* (Wulp, 1896) y *G. jaynesi* (Aldrich, 1932). Considerando los siete departamentos evaluados, el mayor porcentaje de parasitismo se observó en

Santander, seguido de Antioquia, Boyacá y Cesar. En Santander y Boyacá, el sistema productivo predominante es el corte por parejo, mientras que en Antioquia y Cesar prevalece el entresaque (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Especies de parasitoides y porcentaje de parasitismo sobre larvas de barrenadores del tallo en siete departamentos productores de caña de azúcar para panela

Departamento	Especie de parasitoide y porcentaje de parasitismo				
	Alabagrus spp.	*C. flavipes*	*B. claripalpis*	*G. jaynesi*	Total
Antioquia		20,5		9,8	30,3
Boyacá	3,2	4,3	15,4	5,7	28,6
Cauca		17,2	2,8	4,6	24,6
Cesar	2,4	22,3	0,7	0,7	26,1
Cundinamarca		4,5	1,8	8,2	14,5
Nariño			12,3	10,2	22,5
Santander	1,0	7,7	10,5	11,8	31

Fuente: Elaboración propia

En la Hoya del Río Suárez se encontraron diez especies de insectos benéficos parasitando larvas de los barrenadores: seis de la familia Braconidae: *Alabagrus albispina* (Cameron, 1887); *A. imitatus* (Cresson, 1873); *A. parvifaciatus* (Cameron, 1911); *A. roibasi* Sharkey, 1988; *A. stigma* (Brullé, 1846), y *C. flavipes*, y cuatro de la familia Tachinidae: *B. claripalpis*, *G. jaynesi*, *Leskia* sp. y *Phytomyptera* sp. (Sarmiento-Naizaque et al., 2021).

Las avispas del género *Alabagrus* han sido registradas en el Amazonas y el Caribe sobre lepidópteros de la familia Crambidae (Campos, 2001); en los estudios realizados por AGROSAVIA se encontró en Boyacá y Santander, y presentó un porcentaje de parasitismo del 6,5 % sobre larvas de *Diatraea* spp. con respecto al total de las larvas parasitadas.

La avispa *C. flavipes* se ha reportado parasitando larvas de *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella* en el valle del río Cauca (Aya et al., 2017; Londoño-Sánchez et al., 2020; Vargas et al., 2013; Vargas et al., 2015); para el presente estudio, se observó el 16,4 % de las larvas de barrenadores de *Diatraea* spp. parasitadas por *C. flavipes* en Boyacá y Santander. Además de ser un parasitoide gregario (de una larva parasitada emergen de 30 a 40 avispas), *C. flavipes* no exhibe preferencia por alguna de las especies de *Diatraea* (Osorio-Mejía, 2018). Con respecto a las moscas Tachinidae, Aya et al. (2017) reportaron a *B. claripalpis* parasitando a *D. saccharalis* y *D. indigenella* en el Valle del Cauca, mientras que en la Hoya del Río Suárez se encontró a *B. claripalpis* afectando al 44,2 % de las larvas de *Diatraea* spp. A su vez, *G. jaynesi* se ha registrado en los agroecosistemas de caña del Valle del Cauca parasitando diferentes especies de *Diatraea* (Vargas et al., 2015); en Boyacá y Santander se encontró a *G. jaynesi* parasitando el 32,8 % de las tres especies del barrenador, y además se encontró un individuo de *Leskia* sp. parasitando una larva de *Diatraea*.

Recomendaciones para el manejo integrado del complejo *Diatraea* en caña de azúcar para panela

Tal como lo recomienda el ICA en su Resolución 17848 de 2017, el manejo de los barrenadores *Diatraea* se enfoca en el uso del control biológico mediante la conservación, liberación e incremento de parasitoides de huevo, como la avispa *T. exiguum*, y de parasitoides de larva, como la mosca *B. claripalpis* y la avispa *C. flavipes* (ICA, 2017). Debido a los hábitos crípticos de los barrenadores de la caña de azúcar, su control requiere del uso de enemigos naturales capaces de localizar los estados del ciclo de vida de estos insectos

plaga. Tal es el caso de estos tres parasitoides, que son comercializados fundamentalmente para el control del complejo *Diatraea*.

Con el fin de adaptar las recomendaciones de liberación de parasitoides sugeridas por Vargas et al. (2015) para caña de azúcar en las condiciones del Valle del Cauca, se estableció un ensayo en Moniquirá, Boyacá, en el cual se realizó el esquema de liberación de parasitoides para el sistema de corte por parejo, ajustado a la fenología del cultivo de caña de azúcar para panela, según los porcentajes de intensidad de infestación observados en el corte inmediatamente anterior o en lotes circundantes (tabla 3.3) (Osorio-Mejía et al., 2021). Con este plan de liberación, se obtuvo un incremento de 10 toneladas de caña por hectárea (TCH) y de 2,8 toneladas de panela por hectárea (TPH) en la parcela de manejo integrado, en comparación con la parcela testigo (sin liberación de parasitoides). La liberación de los parasitoides debe realizarse preferiblemente hacia la media mañana, evitando la incidencia directa del sol y buscando su distribución homogénea dentro del lote de cultivo, mediante recorridos metódicos, con puntos de parada equidistantes, procurando que los insectos se distribuyan de manera uniforme en el área.

Además de los tres parasitoides que se comercializan, es importante mencionar que las especies *G. jaynesi* y *A. stigma*, encontradas en larvas recolectadas en campo, también ejercen control natural sobre el complejo de barrenadores (Sarmiento et al., 2017; Sarmiento-Naizaque et al., 2021). En este sentido, es importante implementar el control biológico por conservación, que consiste en mantener franjas de vegetación nativa o secundaria en zonas contiguas a los cultivos en las cuales los parasitoides nativos o introducidos puedan establecerse, mediante plantas nectaríferas y otras arvenses que les suministren alimento, refugio y hospederos alternos (Barreto-Triana et al., 2022; Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña], 2017). En la figura 3.2 se muestran algunas de las plantas presentes en los ecosistemas paneleros que atraen a los parasitoides mediante el polen y néctar de sus inflorescencias.

Tabla 3.3. Plan de liberación de parasitoides para control de los barrenadores de caña de azúcar para panela según la intensidad de infestación observada en la cosecha anterior (sistema de corte por parejo)

Porcentaje de intensidad de infestación			
Menor del 4 %		Mayor del 4 %	
Mes	Especie y cantidad por liberar en lote/ha	Mes	Especie y cantidad por liberar en lote/ha
2	25 pulgadas^2 de *T. exiguum*	2	50 pulgadas^2 de *T. exiguum*
4	25 pulgadas^2 de *T. exiguum* 15 individuos de *B. claripalpis*	4	50 pulgadas^2 de *T. exiguum* 30 individuos de *B. claripalpis*
6	15 individuos de *B. claripalpis* 1 g de capullos de *C. flavipes*	6	30 individuos de *B. claripalpis* 2 g de capullos de *C. flavipes*
8	1 g de capullos de *C. flavipes*	8	2 g de capullos de *C. flavipes*

Fuente: Osorio-Mejía et al. (2021)



Figura 3.2. Plantas arvenses de la familia Asteraceae que proveen refugio y alimento a los parasitoides en cultivos de caña para panela. a. Cadillo, *Bidens pilosa*; b. Pincelito, *Emilia fosbergii*; c. Verdolaga, *Eleutheranthera ruderalis*.

Fotos: Pablo Andrés Osorio-Mejía y Nancy del Carmen Barreto-Triana

Eoreuma insuastii Solis & Osorio-Mejía (Lepidoptera: Crambidae): nueva especie identificada en la Hoya del Río Suárez

El barrenador listado de la caña de azúcar para panela, *E. insuastii*, es una nueva especie encontrada en los municipios de Chitaraque, Moniquirá y Santana (Boyacá), y Güepsa, Ocamonte y Valle de San José (Santander), efectuando un daño similar al de *Diatraea* spp. al perforar los tallos y ocasionar el síntoma de marchitez de la yema terminal (corazón muerto).

Su larva presenta una placa color marrón transversal sobre el mesotórax, y bandas longitudinales de tonalidad rosada alternadas por bandas color crema sobre el abdomen (Solis et al., 2020). El 6,8 % del total de los barrenadores encontrados en Boyacá y Santander mediante muestreos mensuales durante dos años correspondieron a esta nueva especie. Dentro del género *Eoreuma*, se destaca el barrenador mexicano del arroz, *E. loftini* (Dyar, 1917), presente en Norteamérica, que además afecta los cultivos de caña y maíz (Solis et al., 2020).

Los huevos de *E. insuastii* son ovoides y de color crema, y miden menos de 1 mm. Las larvas son eruciformes, recién emergidas miden cerca de 1 mm y alcanzan los 20 mm. La pupa, de 15 mm de longitud, es de color café claro y carece de protuberancias cefálicas o laterales (Osorio-Mejía et al., 2021). En la figura 3.3 se muestran la larva, la pupa y el adulto del barrenador listado *E. insuastii*. Este insecto es parasitado por los mismos agentes que parasitan al complejo *Diatraea* spp., aunque con menor frecuencia: *B. claripalpis* y *G. jaynesi* (Diptera: Tachinidae), y *C. flavipes* y *A. stigma* (Hymenoptera: Braconidae) (Solis et al., 2020).



Figura 3.3. Barrenador listado *E. insuastii*. a. Larva; b. Pupa; c. Adulto.

Fotos: Pablo Andrés Osorio-Mejía

Blastobasis graminea Adamski, 1999 (Lepidoptera: Blastobasidae)

El barrenador menor de la caña *B. graminea* se presentó en menos del 1 % de las muestras recolectadas durante 2015 y 2016 en Boyacá y Santander; esta especie afecta a la caña de azúcar para panela, efectuando galerías curvas en los nudos a partir de las yemas, y origina la marchitez de la yema terminal.

El huevo es blanco, esférico y de cerca de 0,5 mm, y tarda nueve días para eclosionar. La larva es eruciforme y de color crema con pináculas ámbar, y alcanza los 11 mm de longitud. Atraviesa por seis estados larvales y dura 39 días. La pupa es obtecta y marrón rojizo, y mide de 5 a 7 mm; transcurre en este estado durante quince días. El adulto es una polilla pequeña de 6 mm de longitud y 15 mm de envergadura, con alas de color amarillo claro y manchas marrones, que vive seis días (Bustillo Pardey, 2012). En la figura 3.4 se ilustran la larva, la pupa y el adulto del barrenador menor, obtenidos en el laboratorio de AGROSAVIA. En Colombia, se ha reportado en el Valle del Cauca en caña de azúcar, y en los estudios realizados por AGROSAVIA se registró su presencia en Boyacá, Cauca, Cesar, Nariño y Santander, afectando caña de azúcar para panela (Sandoval et al., 2015); asimismo, se encontró que larvas de este insecto presentaron parasitismo natural por moscas del género *Phytomyptera* (Diptera: Tachinidae) (Sarmiento-Naizaque et al., 2021).

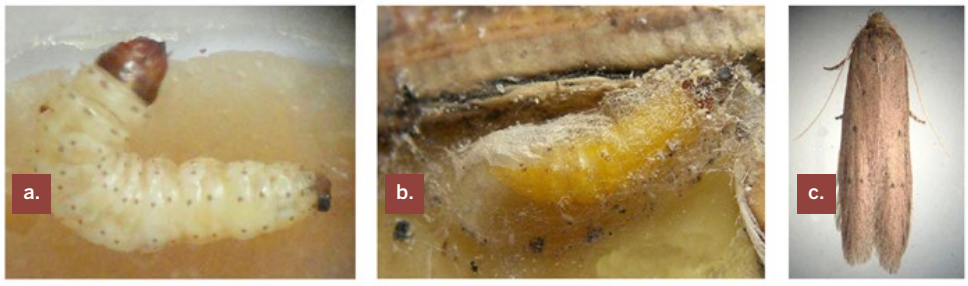


Figura 3.4. Barrenador menor *B. graminea*. a. Larva; b. Pupa; c. Adulto.

Fotos: Pablo Andrés Osorio-Mejía

Myelobia smerintha (Hübner, 1821) (Lepidoptera: Pyralidae)

En los muestreos realizados en Cundinamarca, se recolectaron larvas diferentes al complejo *Diatraea*. Mediante el seguimiento realizado en laboratorio, se estableció que las larvas correspondían a *M. smerintha* (Hübner, 1821) (Lepidoptera: Pyralidae), y se constituye en el primer reporte de esta especie en cultivos de caña de azúcar para panela en el país (Sandoval-Cáceres et al., 2017).

Los barrenadores del género *Myelobia* se reportaron por primera vez en Colombia afectando cultivos de guadua (*Guadua angustifolia* H.) (Hidalgo López, 1978). En los muestreos realizados se observó que el daño causado por *M. smerintha* en caña de azúcar para panela es similar al causado por *Diatraea* spp. La diferencia radica en que *Myelobia* barrena un mayor número de entrenudos en un solo tallo, observándose daño continuo en más de tres entrenudos (figura 3.5).



Figura 3.5. Estados de desarrollo de *M. smerintha*. a. Larva; b. Pupa; c. Adulto; d. Daño ocasionado por *M. smerintha* en tallos de caña de azúcar.

Fotos: Yuly Paola Sandoval-Cáceres

Individuos criados en laboratorio con dieta artificial en condiciones controladas mostraron una duración, desde el primer instar larval hasta el estado de pupa, de 113 días en promedio; de pupa a la emergencia del adulto, de 23 días, con una longevidad del adulto de 8 días (figura 3.5). Además, se observó parasitismo natural de la mosca *Billaea* sp. sobre larvas de *M. smerintha* (Sandoval-Cáceres et al., 2017).

Cerca de 21 especies del género *Myelobia* se han registrado en el mundo (Nuss et al., s. f.). Por ejemplo, *M. smerintha* ha sido reportada en el Neotrópico en México, Honduras, Colombia, Brasil y Paraguay (Landry et al., 2015; Passoa, 1985; Sandoval-Cáceres et al., 2017).

Myelobia afecta diversas especies de la familia Poaceae, principalmente. Yépez y Linares (1987) reportan este género como plaga de caña brava (*Arundo donax* L.), mientras que Ayquipa y Cueva (1979), Landry et al. (2015), Hidalgo López (1978) y Valbuena et al. (2008) indican su presencia en cultivos de guadua, y Neto y Ramos-Elorduy (2006) en cultivos de bambú (*Bambusa* spp.).

Parasitoides asociados a los barrenadores *Diatraea* spp., *E. insuastii*, *B. graminea* y *M. smerintha*

En la figura 3.6 se muestran los parasitoides asociados a los barrenadores *Diatraea* spp., *E. insuastii*, *B. graminea* y *M. smerintha* en cultivos de caña de azúcar para panela.

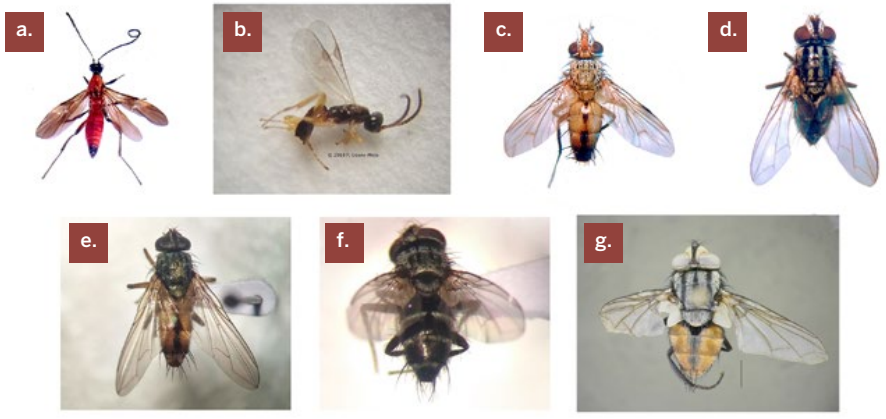


Figura 3.6. Parasitoides de barrenadores de caña para panela. a. *Alabagrus* sp.; b. *C. flavipes*; c. *G. jaynesi*; d. *B. claripalpis;* e. *Leskia* sp.; f. *Phytomyptera* sp.; g. *Billaea* sp. emergida de *M. smerintha*.

Fotos: Zaida Xiomara Sarmiento-Naizaque, Pablo Andrés Osorio-Mejía y Yuly Paola Sandoval-Cáceres

Conclusiones

Entre los barrenadores de la caña de azúcar para panela en Colombia, el complejo *Diatraea* origina la mayor incidencia de daño con las especies *D. busckella*, *D. indigenella*, *D. saccharalis* y *D. tabernella*. Con menor incidencia, se presentan también el barrenador menor *B. graminea*, el barrenador listado *E. insuastii* (en la Hoya del Río Suárez) y el barrenador de la guadua *M. smerintha* (en Cundinamarca). En Boyacá y Santander se encontró una importante diversidad de parasitoides de *Diatraea* spp., siendo *B. claripalpis*, *G. jaynesi* y *C. flavipes* las especies con

mayor presencia, mientras que *Alabagrus* spp. se presentó con menor frecuencia. Considerando la existencia de una variedad de parasitoides de los barrenadores de la caña establecidos en las principales regiones productoras de caña para panela del país, el control biológico por conservación constituye la estrategia más útil para el manejo de este complejo de insectos.

Agradecimientos

Agradecemos a los productores de la agroindustria panelera por permitir la toma de muestras en sus fincas. A Fedepanela, por su colaboración en la ubicación de los municipios. Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en desarrollo de la agenda de investigación. Al equipo de trabajo en entomología del Centro de Investigación Tibaitatá y de la sede Cimpa de AGROSAVIA. Los resultados corresponden a los proyectos "Especies de *Diatraea*, microorganismos con potencial para su control biológico y compuestos de la feromona sexual identificados", "Fluctuación poblacional de *Diatraea* spp. y sus parasitoides en la Hoya del Río Suárez" y "Estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades asociadas a cultivos de caña de azúcar en regiones productoras de panela en Colombia". A Cenicaña y al Dr. Germán Vargas, por su asesoría científica.

Referencias

Araújo, J. R., Botelho, P. S. M., Araújo, S. M. S. S., Almeida, L. C., & Degaspari, N. (1985). Nova dieta artificial para criação da *Diatraea saccharalis* (Fabr.). *Saccharum APC*, (36), 45-48.

Aya, V. M., Echeverri-Rubiano, C., Barrera, G. P., & Vargas, G. (2017). *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) as a biological control agent of sugarcane stem borers in Colombia's Cauca River Valley. *Florida Entomologist*, *100*(4), 826-830. https://doi.org/10.1653/024.100.0426

Ayquipa, G. E., & Cueva, M. A. (1979). Nombres científicos y comunes de los insectos que atacan a la caña de azúcar en el Perú. *Revista Peruana de*

Entomología, *22*(1), 95-97. https://www.revperuentomol.com.pe/index.php/rev-peru-entomol/article/view/691

Barrera, G. P., Villamizar, L. F., Espinel, C., Quintero, E. M., Belaich, M. N., Toloza, D. L., Ghiringhelli, P. D., & Vargas, G. (2017). Identification of *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae) based on cytochrome oxidase II. *PLOS ONE*, *12*(9), artículo e0184053. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184053

Barreto-Triana, N., Osorio-Mejía, P., Insuasty Burbano, O., Sarmiento-Naizaque, Z., Sandoval-Cáceres, Y., Barona-Rodríguez, A., Jiménez-Vargas, J., & Gómez-Benavides, J. (2022). *Conozca a sus aliados para el manejo del barrenador* Diatraea *spp. en caña de azúcar para panela*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Bleszynski, S. (1969). The taxonomy of the crambine moth borers of sugar cane. En J. R. Williams, J. R. Metcalfe, R. W. Mungomery, & R. Mathes (Eds.), *Pests of sugar cane* (pp. 11-59). Elsevier.

Brown, B. V., Borkent, A., Cumming, J. M., Wood, D. M., Woodley, N. E., & Zumbado, M. A. (2010). *Manual of Central American Diptera* (Vol. 2). NRC Research Press.

Bustillo Pardey, A. E. (2012). *Insectos plaga y organismos benéficos del cultivo de la caña de azúcar en Colombia*. Cenicaña.

Campos, D. F. (2001). Lista de los géneros de avispas parasitoides Braconidae (Hymenoptera: Ichneumonoidea) de la región neotropical. *Biota Colombiana*, *2*(3), 193-232. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/32724/100-100-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña]. (2017). *Manual de reconocimiento de arvenses en el cultivo de la caña de azúcar*. https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/manual_arvenses/manual_reconocimiento_arvenses.pdf

Gómez, L. A., & Vargas, G. A. (2014). *Los barrenadores de la caña de azúcar,* Diatraea *spp., en el valle del río Cauca: investigación participativa con énfasis en control biológico*. Cenicaña. https://www.researchgate.net/publication/277248426_Los_barrenadores_de_la_cana_de_azucar_Diatraea_spp_en_el_valle_del_rio_Cauca_investigacion_participativa_con_enfasis_en_control_biologico

Guimaraes, J. H. (1977). A revision of the genus *Paratheresia* Townsend (Diptera: Tachinidae, Theresiini). *Papéis Avulsos de Zoologia*, *30*(18), 267-288. https://eurekamag.com/research/000/276/000276688.php

Hensley, S. D., & Hammond, A. M. (1968). Laboratory techniques for rearing the sugarcane borer on an artificial diet. *Journal of Economic Entomology*, *61*(6), 1.742-1.743. https://doi.org/10.1093/jee/61.6.1742

Hidalgo López, O. (1978). *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia. https://bambubioartefato.files.wordpress.com/2014/07/1978-nuevas-tecnicas-de-construccion-con-bambu-o-lopez-149pg.pdf

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2014, 17 de diciembre). Resolución 4347 de 2014. Por medio de la cual se declara el Estado de Emergencia Fitosanitaria en los departamentos de Boyacá y Santander por las altas incidencias de los barrenadores del tallo (*Diatraea* spp.) y la hormiga loca (*Nylanderia fulva*) en los cultivos de caña panelera (*Saccharum officinarum*). https://xperta.legis.co/visor/legcol/legcol_0b632d793de101dae0530a01015101da/coleccion-de-legislacion-colombiana/resolucion-4347-de-diciembre-17-de-2014

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2017, 20 de diciembre). Resolución 17848 de 2017. Por medio de la cual se establecen medidas fitosanitarias en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp. L) en el territorio nacional para la vigilancia y control de las especies barrenadoras del tallo del género *Diatraea* Guilding. https://www.ica.gov.co/getattachment/5491c441-fc40-4a4c-800e-e5efb6177b86/2017R17848.aspx

Landry, B., Maes, J.-M., Passoa, S. C., & Léger, T. (2015). Description of a new species of *Myelobia* Herrich-Schäffer (Lepidoptera, Pyralidae s.l., Crambinae) from Nicaragua feeding on cultivated bamboo, *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn. (Poaceae). *The Journal of Research on the Lepidoptera*, *48*, 65-81. https://www.researchgate.net/publication/283209149_Description_of_a_new_species_of_Myelobia_Herrich-Schaffer_Lepidoptera_Pyralidae_sl_Crambinae_from_Nicaragua_feeding_on_cultivated_bamboo_Guadua_aculeata_Rupr_ex_E_Fourn_Poaceae

Lastra, L. A., & Gómez, L. A. (1987). *Evaluación del efecto de diferentes dietas artificiales sobre la biología del* Diatraea *y sus parásitos* [presentación en congreso]. Cenicaña, Cali, Colombia.

Linares, B. A. (1987). Influencia de la temperatura en el desarrollo de *Diatraea saccharalis* Fabricius. *Caña de Azúcar. Revista del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias Venezuela*, *5*(2), 43-66.

Londoño-Sánchez, C., Montoya-Lerma, J., Michaud, J. P., & Vargas, G. (2020). The gregarious parasitoid *Cotesia flavipes* displays a high level of preadaptation to a novel host, *Diatraea indigenella*. *BioControl*, *65*, 37-46. https://doi.org/10.1007/s10526-019-09980-y

Medina Pereyra, P., Ordano, M., Reguilón, C., Salvatore, A. R., Acosta, C., & Risso, L. (2016). El papel de la densidad y la proporción sexual de adultos en la fecundidad de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) en jaulas de cría masiva. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, *75*(3-4), 165-171. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0373-56802016000200009&lng=es&nrm=iso

Muirhead, K., Austin, A., & Sallam, M. (2008). The systematics and biology of *Cotesia nonagriae* (Olliff) stat. rev. (Hymenoptera: Braconidae: Microgastrinae), a newly recognized member of the *Cotesia flavipes* species complex. *Zootaxa*, *1846*(1), 35-46. https://doi.org/10.11646/zootaxa.1846.1.3

Neto, E. M. C., & Ramos-Elorduy, J. (2006). Los insectos comestibles de Brasil: etnicidad, diversidad e importancia en la alimentación. *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa*, *38*, 423-442. http://sea-entomologia.org/PDF/GeneralInsectorum/GE-0062.pdf

Nunez, E., & Couri, M. S. (2011). Revision of neotropical Genea Rondani (Diptera, Tachinidae, Tachininae, Leskiini). *Papéis Avulsos de Zoologia*, *51*(31). 481-497. https://www.scielo.br/j/paz/a/sCdyqKgr7gNRNNCGN4B8VSt/?lang=en&format=pdf

Nuss, M., Landry, B., Mally, R., Vegliante, F., Tränkner, A., Bauer, F., Hayden, J., Segerer, A., Schouten, A., Li, H., Trofimova, T., Solis, M. A., De Prins, J., & Speidel, W. (s. f.). *Global Information System on Pyraloidea*. www.pyraloidea.org

Osorio-Mejía, P. A. (2018). *Preferencia de* Cotesia flavipes *(Hymenoptera: Braconidae) sobre barrenadores* Diatraea *spp. (Lepidoptera: Crambidae) de caña para panela* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63874

Osorio-Mejía, P. A., Sarmiento-Naizaque, Z. X., Barreto-Triana, N., & Solis, M. A. (2021). El barrenador listado *Eoreuma insuastii* Solis

and Osorio-Mejía 2020 (Lepidoptera: Crambidae): nueva plaga de la caña de azúcar para panela en Colombia. En Sociedad Colombiana de Entomología (Ed.), *Memorias y resúmenes 48.º Congreso Socolen* (p. 12). https://www.socolen.org.co/_files/ugd/040ab7_6fd455626789431f96a5e6a647dfbb9e.pdf

Parra, J.R.P. (2021). Criação massal de inimigos naturais. En: . Parra, J.R.P., Pinto, A de S., Nava, D.E., Oliveira, R.C.; Diniz, A.J. F (Eds), *Controle biológico com parasitoides e predadores na agricultura brasileira* (pp. 143-164). FEALQ.

Passoa, S. C. (1985). *Taxonomy of the larvae and pupae of economically important* Pyralidae *in Honduras*. University of Florida.

Pastrana, C. E., Gómez, L. A., & Zuluaga, L. (1993). Ciclo de vida de *Diatraea indigenella* bajo varios regímenes alimenticios. *Revista Colombiana de Entomología*, *19*(3), 101-107. https://revistacolombiana entomologia.univalle.edu.co/index.php/SOCOLEN/article/download/10063/12860/32019

Pérez, E. F., & Martínez, K. S. (2011). Distribución espacial y ciclo de vida de *Diatraea* spp. en plantaciones de *Saccharum officinarum* (Caquetá, Colombia). *Ingenierías & Amazonía*, *4*(2), 122-130.

Pinto, J. L. (1990). *Valoración de daño por* Diatraea *spp. en caña panelera. Programa Nacional Caña Panelera*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Sandoval, Y., Osorio-Mejía, P., Gómez, J., Barreto-Triana, N., Espinel, C., & Villamizar, L. (2015). Distribución de especies y enemigos naturales de *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae) en caña panelera *Saccharum officinarum* L. en Colombia. En Sociedad Colombiana de Entomología (Ed.), *Memorias y resúmenes 42.º Congreso Socolen* (p. 691).

Sandoval-Cáceres, Y. P., Vergara-Navarro, E. V., Landry, B., Perilla-López, J. M., & Barreto-Triana, N. (2017). First record of *Myelobia smerintha* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae: Crambinae) in sugarcane in Colombia. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, *33*(1), 105-110. https://doi.org/10.3954/JAUE17-12.1

Sarmiento, Z., Osorio-Mejía, P., Sandoval, Y., Insuasty, O., Romero, Y., & Barreto-Triana, N. (2017). Parasitoides de *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae) en caña para panela en Boyacá y Santander. En Sociedad Colombiana de Entomología (Ed.), *Memorias y resúmenes 44.º Congreso Socolen* (p. 479).

Sarmiento-Naizaque, Z. X., Sarmiento, C. E., & Barreto-Triana, N. (2021). Parasitoides, Braconidae (Hymenoptera) y Tachinidae (Diptera) de barrenadores, Crambidae y Coleophoridae (Lepidoptera) de caña de azúcar para la producción de panela en Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, *47*(2), artículo e10558. https://doi.org/10.25100/socolen.v47i2.10558

Solis, M. A., & Metz, M. (2016). An illustrated guide to the identification of the known species of *Diatraea* Guilding (Lepidoptera, Crambidae, Crambinae) based on genitalia. *ZooKeys*, *565*, 73-121. https://doi.org/10.3897/zookeys.565.6797

Solis, M. A., Osorio-Mejía, P., Sarmiento-Naizaque, Z. X., & Barreto-Triana, N. (2020). A new species of *Eoreuma* Ely (Pyraloidea: Crambidae: Crambinae) feeding on sugarcane from Colombia. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, *122*(2), 471-481. https://doi.org/10.4289/0013-8797.122.2.471

Valbuena, H. D., Jiménez, N. M., Canal, N. A., Galeano, P. E., & Cuadros, M. (2008). Daño de *Myelobia* sp. (Lepidoptera: Pyralidae) en plantaciones de *Guadua angustifolia* Kunth en el departamento del Tolima. *Revista Tumbaga*, *3*, 54-62. https://www.researchgate.net/publication/277259494_Dano_de_Myelobia_sp_Lepidoptera_Pyralidae_en_plantaciones_de_guadua_angustifolia_Kunth_en_el_departamento_del_Tolima

Vargas, G., Gómez, L. A., & Michaud, J. P. (2015). Sugarcane stem borers of the Colombian Cauca River Valley: Current pest status, biology, and control. *Florida Entomologist*, *98*(2), 728-735. https://doi.org/10.1653/024.098.0249

Vargas, G., Lastra, L. A., & Solís, M. A. (2013). First record of *Diatraea tabernella* (Lepidoptera: Crambidae) in the Cauca River Valley of Colombia. *Florida Entomologist*, *96*(3), 1.198-1.201. https://www.jstor.org/stable/23609443

Wharton, R. A. (1993). Bionomics of the Braconidae. *Annual Review of Entomology*, *38*, 121-143. https://doi.org/10.1146/annurev.en.38.010193.001005

Yépez, G. A., & Linares, B. (1987). Nomenclatura aprobada para los índices de evaluación del daño por taladradores *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Pyralidae) en caña de azúcar en Venezuela. *Caña de Azúcar*, *5*, 101-103.

Capítulo 4

Enfermedades prevalentes en variedades de caña de azúcar para panela y su relación con factores abióticos en Boyacá y Santander

Angela María Vargas Berdugo, Leidy Yibeth Deantonio-Florido, Ayda Fernanda Barona Rodríguez, Javier Jiménez Vargas y Nancy del Carmen Barreto-Triana

Resumen

En Colombia, el cultivo de caña de azúcar para panela registra una alta incidencia de enfermedades de importancia económica, lo que ocasiona pérdidas productivas aún no cuantificadas. El objetivo del presente estudio fue identificar y determinar la incidencia de enfermedades sistémicas y foliares prevalentes en las variedades comerciales de caña de azúcar RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 en Boyacá y Santander, y su posible relación con factores abióticos como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, el brillo solar y la altitud. Se colectaron muestras de tejido foliar para determinar la presencia de las enfermedades más comunes. Posteriormente, se realizó un análisis de correspondencia múltiple para relacionar 10 variables y 139 categorías. Los principales resultados obtenidos por variedad fueron: la variedad CC 93-7711 mostró alta susceptibilidad a las enfermedades foliares de roya café, con incidencia del 100 % y severidad del 72 %, y mancha de anillo, con incidencia del 100 % y severidad entre el 11 y el 51 %. La variedad RD 75-11, en contraste, presentó alta incidencia de roya naranja y de mancha de anillo (cercana al 100 %), y una severidad del 51 %. En la variedad CC 01-1940 se cuantificó una incidencia de roya naranja entre el 30 y el 100 %, y una severidad entre el 11 y el 51 %. De las tres variedades evaluadas, la CC 01-1940 fue la única positiva para el virus de la hoja amarilla, con una incidencia del 83 %. Este

estudio brinda información básica, pero actualizada, que contribuye a mejorar el manejo integrado de enfermedades de la caña de azúcar para producción de panela en las variedades de mayor adopción en las zonas productoras evaluadas.

Palabras clave: variedades, virus de la hoja amarilla, roya café, roya naranja

Introducción

En Colombia, la primera enfermedad registrada en caña de azúcar fue el virus del mosaico de la caña de azúcar (SCMV, por sus siglas en inglés: *Sugarcane mosaic virus*), la cual produjo pérdidas en rendimiento de entre el 2,5 y el 33,4 %. No obstante, para caña de azúcar se han identificado otros problemas fitosanitarios asociados a hongos, bacterias y nematodos (Victoria et al., 1995). Para el caso de enfermedades ocasionadas por hongos, se reconocen a la fecha la pudrición roja (*Physalospora tucumanensis* Speg), el mal de piña (*Ceratocystis paradoxa* [De Seynes] C. Moreau), el muermo rojo o pudrición del tallo (*Colletotrichum falcatum* Went), la mancha de anillo (*Leptosphaeria sacchari* Breda de Haan), la mancha de ojo (*Bipolaris sacchari* [E. J. Butler] Shoemaker), el cogollo retorcido (*Fusarium moniliforme* anamorfo de *Gibberella fujikuroi* [Sawada] Wollenw.), el carbón (*Ustilago scitaminea* Syd. Sinom. *Sporisorium scitamineum* [Syd.] M. Piepenbr., M. Stoll & Oberw.), la roya café (*Puccinia melanocephala* Syd. & P. Syd.) y la roya naranja (*Puccinia kuehnii* [W. Krüger] E. J. Butler). Para el caso de enfermedades bacterianas, sobresalen el raquitismo de la soca (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*) y la escaldadura de la hoja (*Xanthomonas albilineans* [Ashby] Dowson). En cuanto a virus, el SCMV (Osorio, 2007) y el virus de la hoja amarilla (SCYLV, por sus siglas en inglés: *Sugarcane yellow leaf virus*) han sido identificados como los más comunes.

La Hoya del Río Suárez (HRS) es una de las principales regiones productoras de caña de azúcar para panela de Colombia. Incluye

23 municipios, en la actualidad cuenta con cerca de 46.912 hectáreas cultivadas y registra los mayores rendimientos promedio del país para la producción de panela (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], s. f.). Por la histórica importancia de la HRS, en 1997 se documentaron e identificaron trece enfermedades en el cultivo de caña de azúcar, entre las cuales, para ese momento, las más frecuentes correspondían al carbón de la caña, el raquitismo de la soca, la mancha de ojo, la mancha de anillo y el ataque de nematodos fitoparásitos. Como resultado, la principal recomendación en dicho estudio fue realizar vigilancia fitosanitaria periódica a los cultivos (Insuasty Burbano & Manrique Estupiñán, 1997). En cuanto al manejo de enfermedades, Cenicaña ha evaluado alternativas químicas, prácticas culturales, estrategias de fertilización y —la principal— control varietal por medio de la obtención de variedades con alta tolerancia a enfermedades (Ángel et al., 2010b; Tarazona Parra, 2011).

A pesar de este contexto, teniendo en cuenta la relevancia de la zona para la producción de panela a nivel nacional, se evidencia la necesidad de continuar con el seguimiento y la determinación de la prevalencia de enfermedades que puedan llegar a ser limitantes para el sistema productivo en la HRS y su posible relación con variables climáticas específicas, condiciones biofísicas y ambientales, el escaso uso de semilla de calidad y la disminución en las prácticas de monitoreo periódico de plagas y enfermedades en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. Es importante resaltar que incluir en el manejo integrado de enfermedades una línea base diagnóstica actualizada hace posible que este sea dinámico y se direccione a controlar la diseminación de enfermedades nuevas o emergentes. De este modo es posible soportar la toma de decisiones de forma acertada en los sistemas de producción de caña de azúcar para producción de panela. La actualización de la información sanitaria y de los estudios para estimar las pérdidas económicas ocasionadas bajo diferentes niveles de prevalencia de las enfermedades siempre será una herramienta de utilidad para el manejo integrado del cultivo, que está direccionado a garantizar

un rendimiento adecuado y a evitar la diseminación de enfermedades en zonas libres de algunas de ellas.

Los resultados de este estudio aportan al sector panelero una base diagnóstica actualizada de la incidencia y severidad de enfermedades en las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y de su relación con factores abióticos como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, el brillo solar y la altitud en municipios paneleros de la HRS.

Metodología

Área de estudio y variedades

El reconocimiento de las enfermedades asociadas al cultivo de caña de azúcar para la producción de panela se realizó durante el año 2019, en 21 fincas y 43 parcelas ubicadas en rangos altitudinales entre los 1.200 y 2.000 m s. n. m., en los municipios de Barbosa, Güepsa, Vélez, San Benito, Ocamonte, Páramo y Valle de San José, en el departamento de Santander, y Moniquirá, Togüí, San José de Pare y Santana, en el departamento de Boyacá (figura 4.1). Las variedades evaluadas fueron RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711, con edades entre siete y diez meses, en parcelas comerciales sin mezcla de variedades.

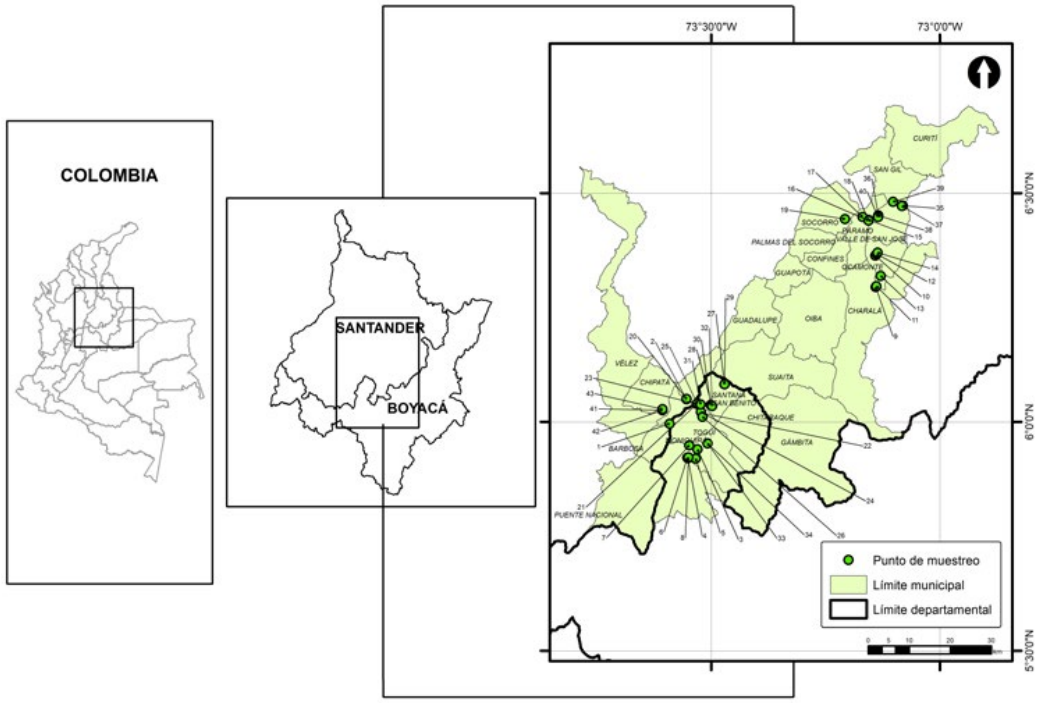


Figura 4.1. Ubicación geográfica del área de estudio en Santander y Boyacá, y puntos de muestreo de las tres variedades comerciales de caña: CC 01-1940, CC 93-7711 y RD 75-11.

Fuente: Gustavo Araujo Carrillo, investigador máster de AGROSAVIA

Muestreo y determinación de la incidencia y severidad de enfermedades foliares

Por parcela de cada variedad, se muestrearon 20 plantas aleatoriamente, realizando la colecta de la primera hoja con cuello visible —también conocida como hoja TVD, por sus siglas en inglés: *top visible dewlap* (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña], 2003)—. De cada una de las 20 hojas TVD por variedad, se realizó un registro fotográfico de alta resolución de secciones longitudinales de aproximadamente 50 cm^2 para calcular el porcentaje de severidad de las enfermedades foliares, empleando el *software* ImageJ (Schneider et al., 2012)

y el siguiente cálculo: área foliar afectada dividida por el área total evaluada (50 cm^2). La proporción obtenida fue multiplicada por 100. Para determinar el porcentaje de incidencia, se cuantificó el número de hojas con presencia de la enfermedad dividido por la totalidad de las hojas evaluadas. Esta proporción también fue multiplicada por 100. Las enfermedades evaluadas visualmente fueron las siguientes: muermo rojo o pudrición del tallo (*C. falcatum*), mancha de anillo (*L. sacchari*), mancha de ojo (*B. sacchari*), roya café (*P. melanocephala*) y roya naranja (*P. kuehnii*), siguiendo la guía de evaluación en campo reportada por Ángel Sánchez et al. (2016) y Ovalle (2018).

Muestreo y diagnóstico de enfermedades sistémicas

La incidencia o presencia de enfermedades sistémicas para cada una de las muestras colectadas en campo se enfocó en un análisis visual para el hongo *C. falcatum*, causante del muermo rojo en caña, y en la detección en laboratorio de los agentes causales del raquitismo de la soca (*L. xyli* subsp. *xyli*), la escaldadura de la hoja (*X. albilineans*) y el SCYLV, estas tres últimas reportadas actualmente por Cenicaña como las enfermedades sistémicas más limitantes en la producción. Dichos análisis fueron realizados empleando el servicio de diagnóstico de enfermedades de Cenicaña, atendiendo las recomendaciones de colecta para el diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar (Cenicaña, 2023). De forma general, en cada predio se colectaron 20 hojas TVD de plantas independientes por cada variedad.

En los laboratorios de diagnóstico de Cenicaña, los métodos empleados para los patógenos sistémicos evaluados fueron los siguientes para la totalidad de las muestras colectadas en campo: *L. xyli* subsp. *xyli* y *X. albilineans*: método de inmunoenzimática de TBIA (*tissue-blot inmunoassay*), basado en la impresión de la nervadura central de la hoja colectada sobre membranas de nitrocelulosa, usando antisueros policlonales específicos generados por Cenicaña para cada bacteria. La detección del Virus de la hoja amarilla de la caña o (SCYLV por sus siglas en inglés *Sugarcane*

yellow leaf virus) se realizó por RT-PCR (retrotranscripción y reacción en cadena de la polimerasa), a partir de la extracción de los ácidos nucleicos (ARN) de la muestra de hojas de caña (Guzmán & Victoria, 2001); la interpretación de la lectura en gel de agarosa indicó presencia o detección positiva del virus con la marcación de una banda (1.200 pares de base), y ausencia o detección negativa del virus en ausencia de la banda esperada.

Análisis climático

Se emplearon datos meteorológicos suministrados por el Ideam, los cuales fueron previamente depurados por investigadores de AGROSAVIA en el marco del proyecto Reducción del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático – MAPA (Modelos de Adaptación y Prevención Agroclimática). Inicialmente, se realizó la consolidación de la serie de datos climáticos del periodo 1980-2011 de las variables precipitación, o PPT (mm); temperatura media, o TM (°C); brillo solar, o BS (h), y humedad relativa, o HR (%). Para obtener un valor estimado por variable climática en cada punto de muestreo, se realizó la interpolación con el método IDW (*inverse distance weighted*), y posteriormente se llevó a cabo un análisis descriptivo de las variables considerando la distribución de la precipitación a lo largo del año, que determina los periodos agrícolas o los trimestres para los departamentos de Santander y Boyacá, así: diciembre, enero y febrero (DEF); marzo, abril y mayo (MAM); junio, julio y agosto (JJA), y septiembre, octubre y noviembre (SON) (AGROSAVIA, 2015).

Asociación de los factores abióticos y la prevalencia de las enfermedades con las variedades de caña de azúcar para producción de panela

Se realizó un análisis de correspondencia múltiple (ACM) empleando el *software* estadístico R, con el fin de determinar la asociación existente entre las enfermedades foliares (5) y sistémicas (3) y 10 variables, correspondientes a las tres variedades (RD 75-11, CC 93-7711 y CC 01-1940), la prevalencia de la enfermedad (incidencia y severidad) y factores abióticos (temperatura,

precipitación, humedad relativa, brillo solar y altitud); para estos dos últimos grupos de variables, se establecieron 139 categorías (tabla 4.1). Con el propósito de reducir el número de interacciones, se seleccionaron dimensiones (datos no mostrados) con explicación de variabilidad de ≥70 %, representando, finalmente, mediante gráficos *biplot*, la estructura de relación entre las variables y la contribución (peso de una variable respecto a otras).

Tabla 4.1. Variables categorizadas para el ACM

Variable	Enfermedad diagnosticada					
	Mancha de anillo	Mancha de ojo	Muermo rojo	Roya café	Roya naranja	SCYLV
Incidencia (%)	0	0	0	0	0	Positiva Negativa
	5-25	25	5-25	15-25	10-25	
	30-55	30-55	30-50	50-55	30-55	
	60-85	60-80	75	60-85	60-85	
	90-100	90-100	100	90-100	90-100	
Severidad (%)	0	0	0	0	0	
	1-5	1-5	1-3	6-13	4-5	
	6-9	6-9	6-10	14-24	6-10	
	11-24	11-25	14-20	28-33	11-25	
	27-51	36	33-47	52-72	26-46	
					65-70	
Temperatura (°C)	17-19	17-19	17-19	17-19	17-19	17-19
	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23
Precipitación (mm)	1.931-2.212	1.931-2.212	1.931-2.212	1.931-2.212	1.931-2.212	1.931-2.212
	2.265-2.446	2.265-2.446	2.265-2.446	2.265-2.446	2.265-2.446	2.265-2.446
	2.454-2.676	2.454-2.676	2.454-2.676	2.454-2.676	2.454-2.676	2.454-2.676
Humedad relativa (%)	75-77	75-77	75-77	75-77	75-77	75-77
	75-84	75-84	75-84	75-84	75-84	75-84
	85-87	85-87	85-87	85-87	85-87	85-87

Continúa

Continuación tabla 4.1

Variable	Enfermedad diagnosticada					
	Mancha de anillo	Mancha de ojo	Muermo rojo	Roya café	Roya naranja	SCYLV
Brillo solar (h)	1.885-1.917	1.885-1.917	1.885-1.917	1.885-1.917	1.885-1.917	1.885-1.917
	1.918-2.047	1.918-2.047	1.918-2.047	1.918-2.047	1.918-2.047	1.918-2.047
	2.054-2.201	2.054-2.201	2.054-2.201	2.054-2.201	2.054-2.201	2.054-2.201
Altitud (m s. n. m.)	1.199-1.383	1.199-1.383	1.199-1.383	1.199-1.383	1.199-1.383	1.199-1.383
	1.418-1.591	1.418-1.591	1.418-1.591	1.418-1.591	1.418-1.591	1.418-1.591
	1.602-1.987	1.602-1.987	1.602-1.987	1.602-1.987	1.602-1.987	1.602-1.987

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Incidencia de enfermedades en caña de azúcar para panela

Se confirmó la prevalencia de las siguientes enfermedades foliares en las zonas productoras de caña para panela donde se realizó la colecta de las muestras: roya café (*P. melanocephala*), roya naranja (*P. kuehnii*), mancha de anillo (*L. sacchari*), mancha de ojo (*B. sacchari*) y muermo rojo (*C. falcatum*). Se observó roya café en la variedad CC 93-7711 únicamente, con una incidencia del 93 %, mientras que la incidencia de roya naranja fue superior en las variedades CC 01-1940 (100 %) y RD 75-11 (93 %); para el caso de la variedad CC 93-7711, la enfermedad no superó el 10 %. En las tres variedades evaluadas la incidencia de mancha de anillo fue superior al 90 %, en tanto que la incidencia de mancha de ojo y muermo rojo fue superior en la variedad CC 01-1940 (75 % y 67 %, respectivamente), seguida de las variedades CC 93-7711 (50 % y 57 %, respectivamente) y RD 75-11 (33 % para las dos enfermedades).

La única enfermedad sistémica confirmada fue el SCYLV, que presentó mayor incidencia en la variedad CC 01-1940 (83 %), seguida de las variedades RD 75-11 (13 %) y CC 93-7711 (7 %). Esto indica que la variedad CC 01-1940 presenta susceptibilidad a este virus bajo las condiciones ambientales de la HRS, hallazgo confirmado también en la zona azucarera del Valle del Cauca (Cardozo Burgos, 2017).

Caracterización climática

Precipitación (mm)

Los municipios del área de estudio cuentan con una PPT acumulada de 1.959 a 2.515 mm anuales (tabla 4.2), distribuidos a lo largo del año, con un régimen bimodal y una variación acorde con las condiciones biofísicas de altitud, paisaje, cobertura vegetal, entre otras. Los municipios que presentan menores volúmenes de PPT son Páramo y Valle de San José (Santander), condición que es más intensa durante el trimestre DEF, con valores entre 161 y 186 mm (tabla 4.2), respectivamente; esto indica que un marcado periodo de sequía podría afectar el comportamiento productivo de las variedades cuando estas no presentan tolerancia a dicha condición, así como generar una mayor susceptibilidad al desarrollo de enfermedades de tipo foliar o aquellas favorecidas con altas temperaturas y baja disponibilidad de agua, como la mancha de ojo y la mancha de anillo. En general, en los municipios que conforman el área de estudio, los trimestres MAM y SON registran mayores volúmenes de PPT, en particular en los municipios de Güepsa, Ocamonte y San Benito (Santander) (tabla 4.2); esto se asocia con una mayor disponibilidad de agua en la atmósfera y en el suelo, y con unos marcados periodos de transición al iniciar y finalizar estos trimestres; es decir, la variación de una época de menores a mayores lluvias podría favorecer y hasta acelerar el desarrollo de los patógenos causantes de las enfermedades reportadas en este estudio. Finalmente, en el trimestre JJA se observa una temporada de transición de menores a mayores volúmenes de PPT (tabla 4.2).

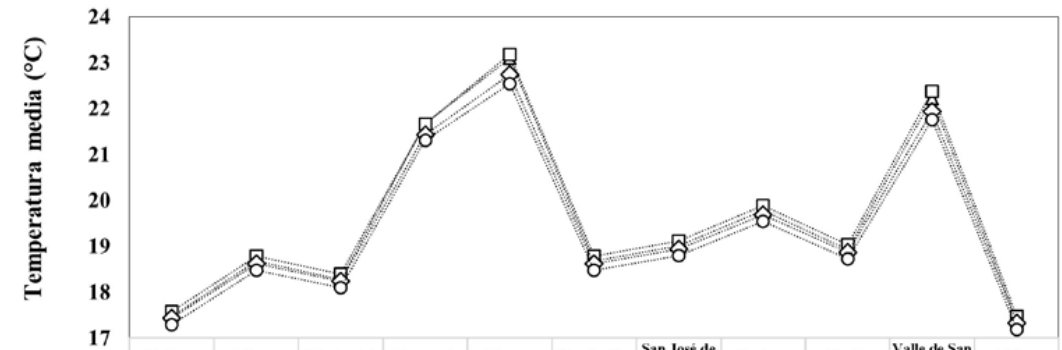
Tabla 4.2. Precipitación promedio acumulada (mm) por trimestre y multianual en el área de estudio

Municipio	Trimestre				Multianual (1981-2011)
	DEF	MAM	JJA	SON	
Barbosa	256	693	558	699	2.212
Güepsa	306	747	619	767	2.446
Moniquirá	252	692	548	679	2.177
Ocamonte	341	758	596	806	2.515
Páramo	161	570	614	609	1.959
San Benito	306	747	619	767	2.446
San José de Pare	309	748	624	767	2.454
Santana	307	740	629	756	2.439
Togüí	297	735	584	737	2.360
Valle de San José	186	587	595	624	2.000
Vélez	268	706	569	716	2.265

Fuente: Elaboración propia

Temperatura media del aire (°C)

La temperatura media fluctúa entre 17 y 23 °C; sin embargo, como se indica en la figura 4.2, la variación por municipio y trimestre no supera 1 °C de diferencia, dado que es una variable relativamente estable por su relación directa con la altitud. A pesar de esto, la variación horaria y diaria de la temperatura podría ser determinante para el desarrollo de las enfermedades, así como el efecto aditivo al integrar las demás variables climáticas que inciden en la zona y el sistema productivo; por tal razón, para el estudio de enfermedades de caña, es fundamental registrar los valores horarios y diarios de las temperaturas máxima, mínima y media del aire, para comprender de manera más precisa la interacción planta-ambiente-patógeno.



	Barbosa	Güepsa	Moniquirá	Ocamonte	Páramo	San Benito	San José de Pare	Santana	Togüi	Valle de San José	Vélez
DEF	17	19	18	22	23	19	19	20	19	22	17
MAM	18	19	18	22	23	19	19	20	19	22	17
JJA	17	19	18	21	23	19	19	20	19	22	17
SON	17	18	18	21	23	18	19	20	19	22	17

Figura 4.2. Temperatura media del aire promedio por trimestre en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Humedad relativa (%)

El promedio multianual en cada uno de los municipios del área de estudio varía entre trimestres de uno hasta cuatro unidades porcentuales. De manera general, se registra una HR del 75-88 % (tabla 4.3). La tendencia a presentar HR superiores al 75 % podría favorecer el desarrollo de buena parte de las enfermedades registradas, así como su transición en la mañana, el medio día y la noche.

Tabla 4.3. Humedad relativa promedio (%) por trimestre en el área de estudio

Municipio	Trimestre			
	DEF	MAM	JJA	SON
Barbosa	87	87	86	88
Güepsa	86	86	85	86
Moniquirá	86	86	85	87
Ocamonte	76	77	78	76
Páramo	74	76	77	72

Continúa

Continuación tabla 4.3

Municipio	Trimestre			
	DEF	MAM	JJA	SON
San Benito	86	86	85	86
San José de Pare	85	85	85	86
Santana	83	84	83	84
Togüí	85	85	85	86
Valle de San José	76	77	79	75
Vélez	87	88	86	88

Fuente: Elaboración propia

Brillo solar (h)

La acumulación de BS anual cuenta con una variación entre 1.885 y 2.192 h en los once municipios relacionados. Sin embargo, el 70 % del área de estudio cuenta con un BS en el orden de 1.885-1.936 h, y solo tres de estos municipios o predios muestreados registran valores superiores: Ocamonte (2.017 h/año), Páramo (2.192 h/año) y Valle de San José (2.156 h/año), ubicados en la provincia de Guanentá, en el departamento de Santander (figura 4.3).

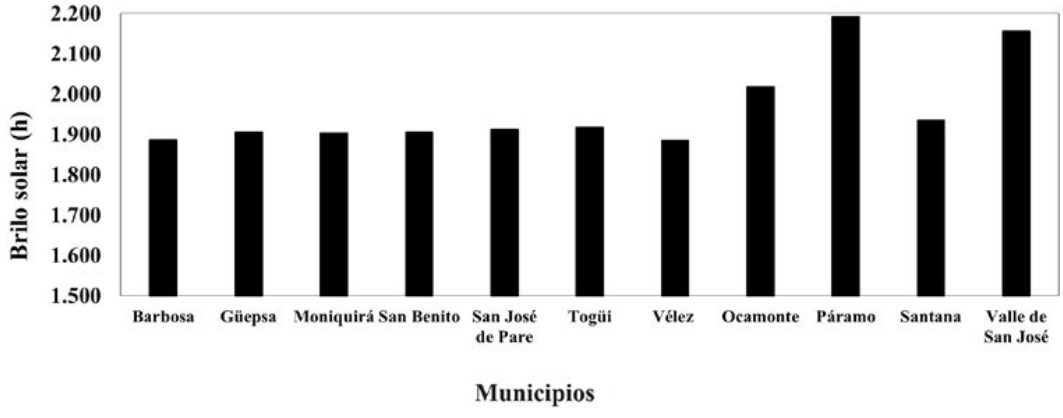


Figura 4.3. Brillo solar anual en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Asociación de los factores abióticos y la prevalencia de las enfermedades con las variedades de caña

Roya café (*P. melanocephala*)

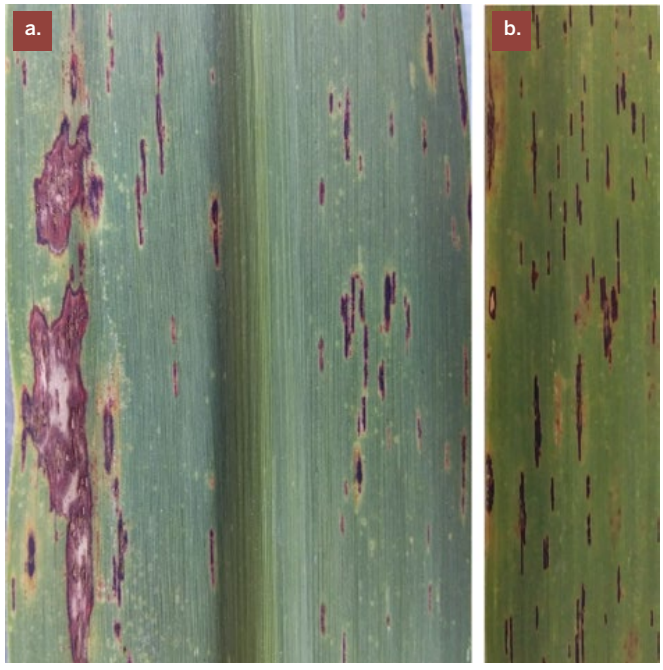


Figura 4.4. Pústulas generadas por *P. melanocephala* en la variedad CC 93-7711. a. Lesiones avanzadas coalescentes con esporulación abundante; b. Lesiones iniciales localizadas sin esporulación.

Fotos: Angela María Vargas Berdugo

El 71,3 % de la variabilidad estuvo asociada con seis dimensiones (datos no mostrados). La variedad CC 93-7711 presentó asociación con incidencias entre el 15 y el 100 % y severidades entre el 6 y el 72 %, independientemente de los factores abióticos (figura 4.4); esto podría indicar una mayor susceptibilidad de la variedad al desarrollo de la roya café (figura 4.4) en las edades monitoreadas. Las variedades RD 75-11 y CC 01-1940, por su parte, no presentaron asociación con la roya café en predios con altitudes entre 1.602 y 1.987 m y volúmenes de precipitación anual entre 1.931 y 2.212 mm; esto podría indicar que el desarrollo

de esta enfermedad se restringe en las condiciones de altitud y precipitación descritas, sumadas a la respuesta genética de cada una de las variedades (figura 4.5).

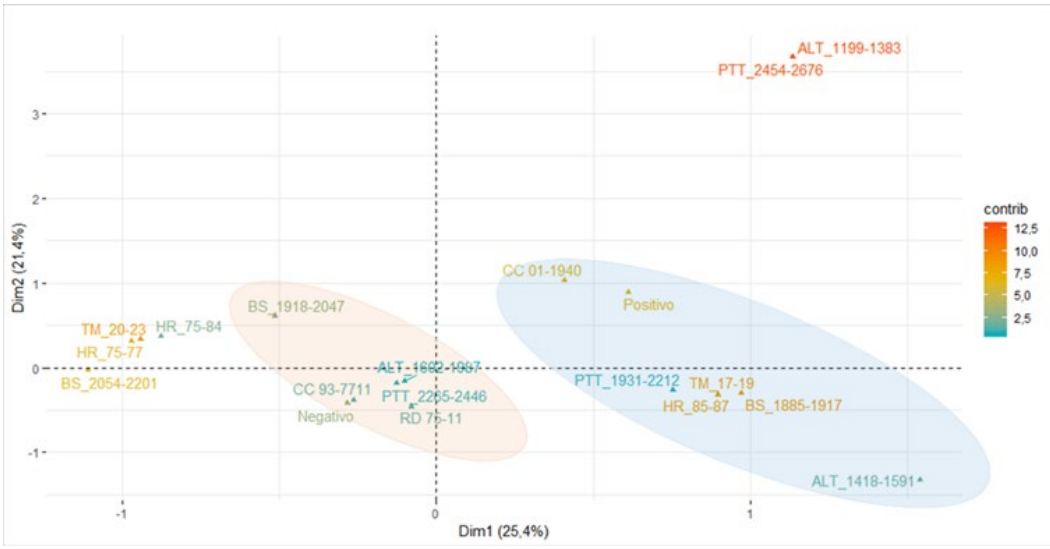


Figura 4.5. Asociación de la prevalencia de la roya café con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

A pesar de que las interacciones entre las variedades y los factores abióticos tienen un efecto directo sobre la resistencia a las enfermedades (Agrios, 2005), los resultados obtenidos en la presente investigación muestran una alta susceptibilidad de la variedad CC 93-7711 y un grado de tolerancia importante por parte de las variedades RD 75-11 y CC 01-1940 a la roya café; como mencionan Ángel et al. (2010a) y Barrera et al. (2012), altos volúmenes de precipitación y alta humedad relativa, acompañados de temperaturas entre 17 y 32 °C, favorecen las infecciones de *P. melanocephala* en caña de azúcar.

Roya naranja (*P. kuehnii*)



Figura 4.6. Pústulas generadas por *P. kuehnii* en dos variedades de caña: lesiones avanzadas coalescentes con esporulación abundante. a. CC 01-1940; b. RD 75-11.

Fotos: Angela María Vargas Berdugo

El 70,4 % de la variabilidad estuvo asociada con dos dimensiones (datos no mostrados). La variedad CC 01-1940 se asoció a incidencias del 10-25 % y a severidades entre el 6 y el 10 % (figura 4.6) en predios con volúmenes de precipitación anual entre 1.031 y 2.212 mm; por su parte, la variedad RD 75-11 se asoció a incidencias del 30-100 % y a severidades entre el 4 y el 70 % (figura 4.6) en predios con altitudes entre 1.602 y 1.987 m, temperaturas anuales promedio entre 17 y 19 °C, humedad relativa promedio anual entre el 85 y el 87 % y brillo solar de 1.885-1.917 h (figura 4.6). Finalmente, la variedad CC 93-7711 no registró daño por el patógeno en las condiciones del presente estudio (figura 4.7).

Contrario a lo observado en roya café, la variedad CC 93-7711 reportó resistencia a roya naranja, a pesar de las condiciones climáticas de la zona de estudio, mientras que en las variedades restantes las incidencias y severidades se relacionaron con precipitaciones anuales cercanas a los 2.000 mm y, para el caso del material RD 75-11, con una alta humedad relativa. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Barrera et al. (2013), Sanjel et al. (2018) y Aday-Díaz et al. (2020), quienes mencionan que la infección y severidad de *P. kuehnii* se ve favorecida por humedades relativas superiores al 80 % (Aday-Díaz et al., 2020). Por otro lado, la alta incidencia y severidad en RD 75-11 cobra gran relevancia en Santander y Boyacá, ya que es la variedad de mayor predominio en la zona y a la que se le atribuyen los bajos rendimientos en la producción de caña, calculados entre el 30 y el 35 % (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2019).



Figura 4.7. Asociación de la prevalencia de la roya naranja con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

Mancha de anillo (*L. sacchari*)

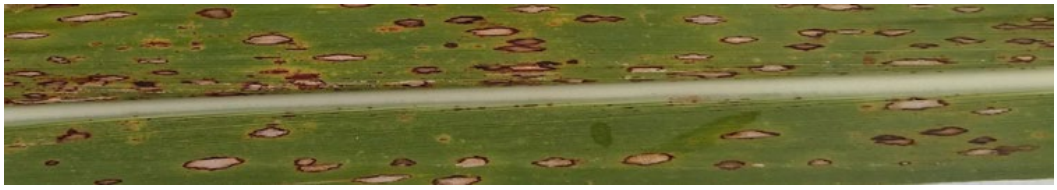


Figura 4.8. Lesiones características ocasionadas por *L. sacchari*.

Foto: Ayda Fernanda Barona Rodríguez

El 70,3 % de la variabilidad estuvo asociada con siete dimensiones (datos no mostrados). La variedad CC 01-1940, establecida en predios con altitudes entre 1.418 y 1.591 m, temperaturas entre 17 y 19 °C, volúmenes de precipitación entre 1.931 y 2.021 mm, humedad relativa entre el 85 y el 87 % y brillo solar de 1.885-1.917 h, se relacionó con incidencias y severidades del 25 y el 5 %, respectivamente. Para el caso de las variedades RD 75-11 y CC 93-7711, estas se relacionaron con incidencias entre el 30 y el 100 % y con severidades entre el 11 y el 51 % en altitudes entre 1.602 y 1.987 m, temperaturas de 20 a 23 °C, volúmenes de precipitación entre 2.265 y 2.446 mm, humedad relativa entre el 75 y el 84 % y brillo solar entre 1.918 y 2.201 h (figuras 4.8 y 4.9).

Los porcentajes de severidad de mancha de anillo observados en el momento del muestreo para las variedades RD 75-11 y CC 93-7711 fueron superiores a los reportados por Ramírez Durán et al. (2014). En este sentido, la respuesta de dichos materiales a *L. sacchari*, además de estar asociada con deficiencias nutricionales (Victoria et al., 1995), está claramente relacionada con las condiciones ambientales registradas en la zona de estudio, ya que, como lo mencionan Kaiser et al. (1979), humedades relativas superiores al 70 % y temperaturas entre 10 y 30 °C contribuyen al incremento de la patogenicidad del hongo sobre diversas variedades de caña de azúcar.

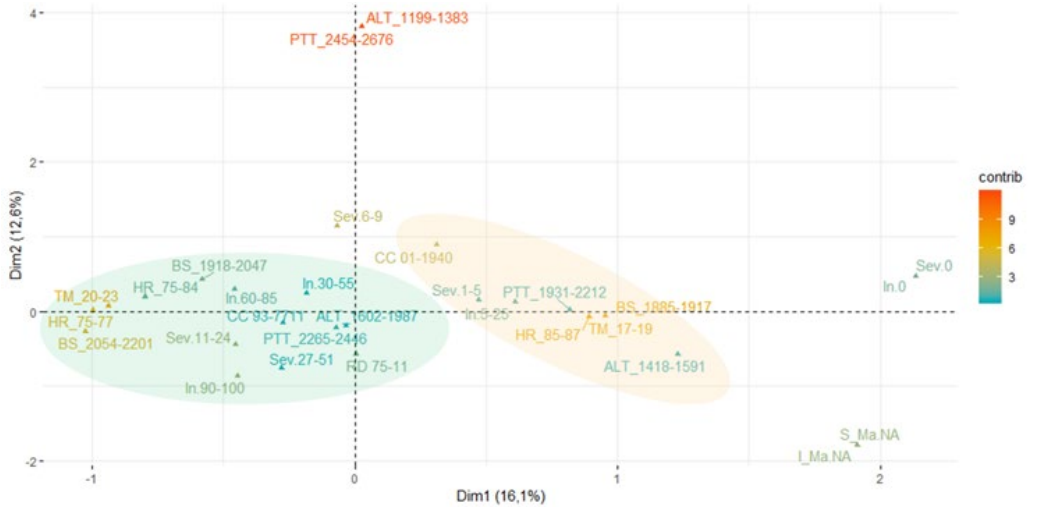


Figura 4.9. Asociación de la prevalencia de la mancha de anillo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

Mancha de ojo (*B. sacchari*)

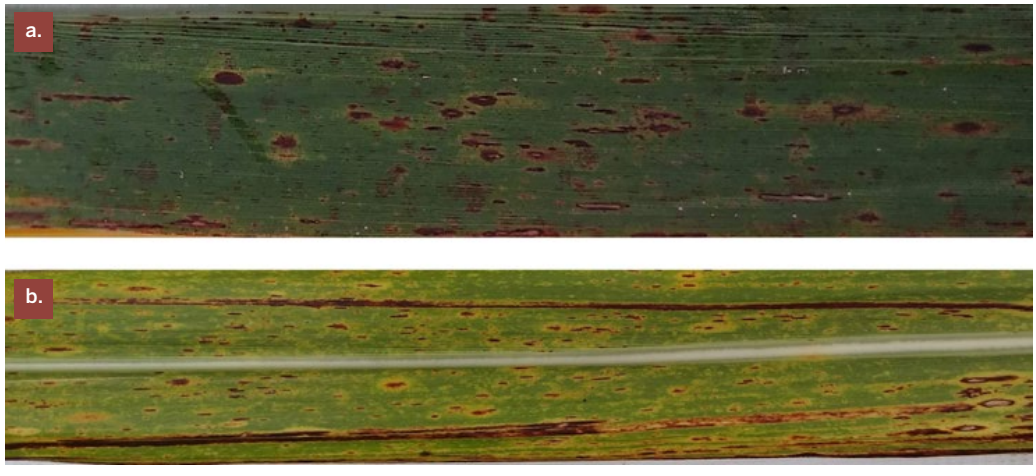


Figura 4.10. Presencia de *B. sacchari* en caña: respuesta diferencial entre dos variedades. a. CC 01-1940; b. RD 75-11.

Fotos: Ayda Fernanda Barona Rodríguez

Siete dimensiones (datos no mostrados) explicaron el 73,4 % de la variabilidad. La variedad CC 01-1940 se asocia con incidencias entre el 25 y el 35 % y con severidades del 1 al 5 % (figura 4.10) en altitudes entre 1.418 y 1.591 m, temperaturas entre 17 y 19 °C, precipitaciones entre 1.931 y 2.212 mm, humedad relativa del 85 al 87 % y brillo solar entre 1.885 y 1.917 h; por su parte, las variedades RD 75-11 (figura 4.10) y CC 93-7711, en altitudes de 1.602 a 1.987 m, con precipitaciones entre 2.265 y 2.446 mm, a temperaturas entre 20 y 23 °C, con una humedad relativa del 75 al 84 % y brillo solar entre 1.918 y 2.201 h, no presentaron daño por el patógeno (figura 4.11).

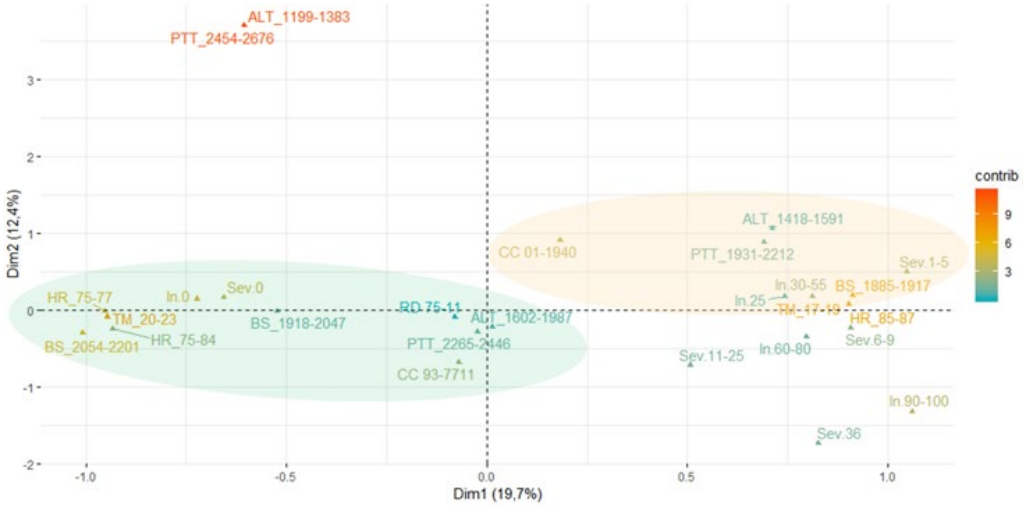


Figura 4.11. Asociación de la prevalencia de la mancha de ojo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de los países productores de caña de azúcar, *B. sacchari* suele estar presente durante todo el año, aunque son más notorias las infecciones en épocas de alta precipitación y humedad relativa, con temperaturas promedio entre 20 y 22 °C

(Saumtally & Sullivan, 2000; Victoria et al., 1995). El resultado obtenido en la presente investigación destaca la alta resistencia a mancha de ojo por parte de los materiales establecidos en la zona de estudio, y concuerda con lo reportado por Ramírez Durán et al. (2014), quienes mencionan que las variedades RD 75-11 y CC 93-7711 son consideradas materiales con buena respuesta al ataque de esta enfermedad.

Muermo rojo o pudrición del tallo (*C. falcatum*)

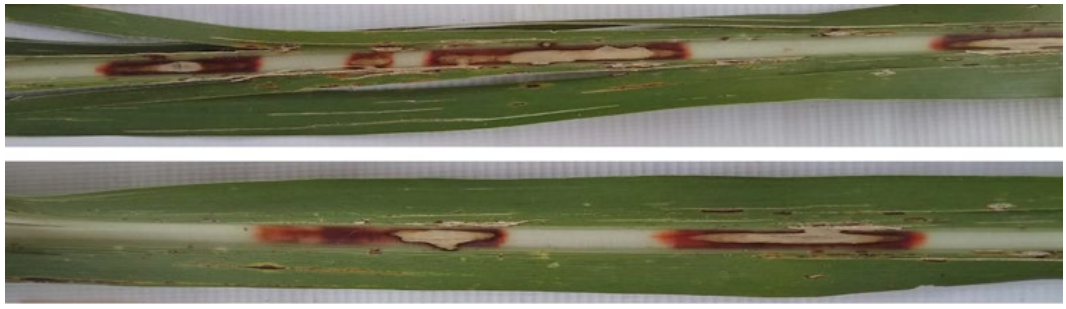


Figura 4.12. Lesiones ocasionadas por *C. falcatum* en la variedad RD 75-11.

Fotos: Ayda Fernanda Barona Rodríguez

Seis dimensiones (datos no mostrados) explicaron el 70 % de la variabilidad. En la figura 4.13 se resaltan dos grupos de categorías que presentaron mayor relación con las variedades evaluadas. La variedad RD 75-11 está asociada a incidencias del 5 al 25 % y a severidades entre el 1 y el 3 % (figura 4.12) en predios ubicados en zonas con precipitaciones entre 1.931 y 2.212 mm, en tanto que las variedades CC 01-1940 y CC 93-7711 se asocian a severidades entre el 6 y el 10 % en ambientes con precipitaciones entre 2.265 y 2.446 mm, humedad relativa entre el 75 y el 84 %, brillo solar entre 1.918 y 2.047 h y altitudes desde los 1.602 hasta los 1.987 m (figura 4.13).

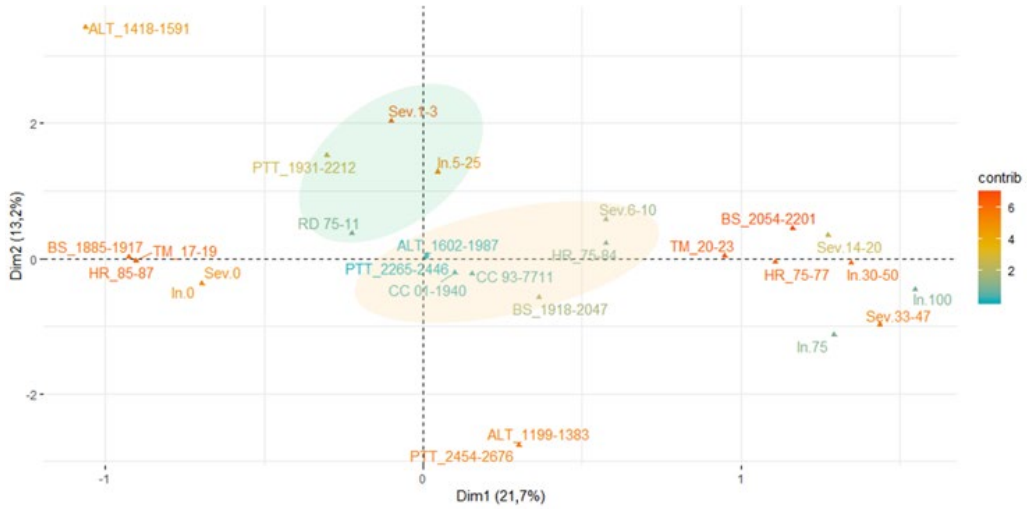


Figura 4.13. Asociación de la prevalencia del muermo rojo con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

El hongo del género *Colletotrichum* es considerado como uno de los patógenos más importantes alrededor del mundo, debido a que causa daños significativos a cultivos de seguridad alimentaria, como cereales, gramíneas, hortalizas, leguminosas, ornamentales y frutales ubicados en zonas tropicales y subtropicales (Prusky et al., 2000). Como indica Agnihotri (1990), entre los materiales de caña de azúcar existen diferencias en el nivel de susceptibilidad al hongo causante del muermo rojo, según el tipo de variedad y las condiciones ambientales. Para el caso específico de *C. falcatum*, las condiciones climáticas que favorecen su desarrollo se asocian principalmente a temperaturas cálidas, entre 16 y 35 °C (Viswanathan, 2021). En este contexto, en la presente investigación, los niveles de precipitación bajos-medios y las mayores altitudes, que biofísicamente se asocian a menores temperaturas (Aigang et al., 2009), permiten potenciar la resistencia de los materiales existentes en la zona productora de caña

de azúcar para panela de Santander y Boyacá, al disminuir los porcentajes de incidencia y severidad de la enfermedad.

Virus de la hoja amarilla (SCYLV)

Cinco dimensiones (datos no mostrados) explicaron el 78,8 % de la variabilidad. La variedad CC 01-1940 se relacionó con resultados positivos para el virus en predios con altitudes entre 1.418 y 1.591 m, temperaturas entre 17 y 19 °C, volúmenes de precipitación entre 1.931 y 2.021 mm y humedad relativa entre el 85 y el 87 %. Para el caso de las variedades RD 75-11 y CC 93-7711, los dos materiales se relacionaron con resultados negativos para el virus en altitudes entre 1.602 y 1.987 m, volúmenes de precipitación entre 2.265 y 2.446 mm y brillo solar entre 1.918 y 2.047 h (figura 4.14).

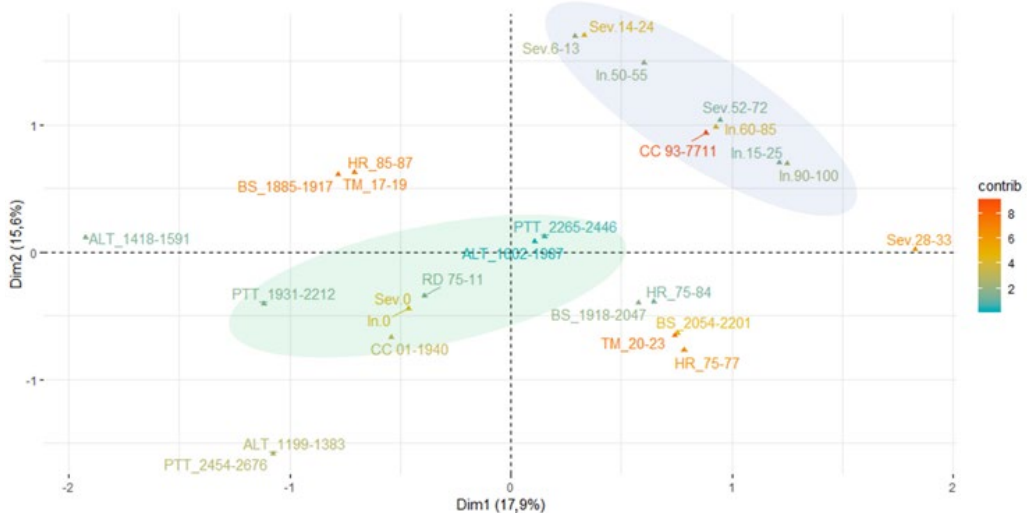


Figura 4.14 Asociación de la prevalencia del virus de la hoja amarilla con las variedades RD 75-11, CC 01-1940 y CC 93-7711 y factores abióticos.

Nota: Variables: In (incidencia), Sev (severidad), TM (temperatura media), PPT (precipitación), HR (humedad relativa), BS (brillo solar) y ALT (altitud). La contribución de las variables se representa en escala de colores, de mayor a menor, así: rojo (8), naranja (6), amarillo (4), verde (2) y azul (0).

Fuente: Elaboración propia

En Colombia, el SCYLV fue registrado en 1998 en el valle del río Cauca en la variedad SP 71-6163, introducida de Brasil, y a partir de esa fecha se han adelantado en el país estudios para desarrollar materiales resistentes que puedan ser incluidos en programas de mejoramiento (Rangel et al., 2002; Victoria et al., 1999). No obstante, la presencia del virus en las zonas productoras de Santander y Boyacá puede deberse, además de a una posible pérdida de resistencia varietal y el uso de material de siembra contaminado, a una transmisibilidad más eficiente del patógeno por su vector, el pulgón de la caña *Melanaphis sacchari* Zehntner (Hemiptera: Aphididae), mediada a su vez por las condiciones climáticas registradas en las zonas productoras. Acorde con esto último, la actividad del pulgón de la caña se ve afectada por la temperatura ambiental y los patrones de lluvia, ya que las poblaciones de la plaga disminuyen con el incremento de la precipitación (Pekarcik & Jacobson, 2021) y con las fluctuaciones de temperatura (Van Rensburg, 1973).

Conclusiones y recomendaciones

El principal efecto de los patógenos foliares como la roya café, la roya naranja, la mancha de anillo o la mancha de ojo es que establecen una asociación considerada parasítica con las plantas de caña de azúcar, en la que obtienen de su hospedante nutrientes y fuentes de carbono para su ciclo biológico. Las consecuencias observables en pérdidas de rendimiento están asociadas, por un lado, a la afectación del órgano fotosintético de las plantas, la lámina foliar, y, por otro lado, al aumento de ciertas rutas biosintéticas de defensa, por lo que se ve afectada la eficiencia en la acumulación y calidad de azúcares que expresan como tal el rendimiento del cultivo. La respuesta de cada agente causal de enfermedad es diferencial, de acuerdo con la respuesta genética de cada variedad y su entorno. Es decir, la expresión sintomática y los niveles de enfermedad tendrán una relación con el genotipo tanto de la planta como del patógeno y el ambiente, que puede a su vez condicionar el desarrollo de uno u otro.

Cuando los niveles de severidad de los patógenos foliares son iguales o superiores al 30 % durante todo el ciclo productivo de caña, puede estarse comprometiendo de manera significativa el rendimiento del cultivo. Para tomar decisiones de manejo, es necesario realizar un análisis puntual de la etapa de desarrollo en que se encuentra, así como un monitoreo adecuado de las diferentes variables climáticas que son conducentes de las enfermedades, de manera similar a la descrita para cada una de las enfermedades identificadas anteriormente estudiadas, pero realizando evaluaciones de incidencia y severidad por lo menos en tres etapas del cultivo: posterior al establecimiento y emergencia de las plantas; en las primeras etapas de desarrollo, cuando se realiza la fertilización; y cuando se hace el corte, ya sea por parejo o por entresaque.

En las condiciones del presente estudio, la variedad CC 93-7711 mostró ser la más susceptible a roya café en comparación con RD 75-11 y CC 01-1940, puesto que registró una incidencia de hasta el 100 % y una severidad de hasta el 72 % para la edad monitoreada, y fue la variedad de mayor tolerancia a roya naranja, puesto que no presentó daños por este patógeno; estos resultados fueron obtenidos de manera independiente a las características ambientales de la zona de estudio, a pesar de que la humedad relativa y los cambios de temperatura pueden ser factores conducentes de enfermedad para las variedades con menor tolerancia. Respecto a la relevancia epidémica y la injerencia en el rendimiento, actualmente la roya naranja ha sido reportada como más agresiva que la roya café, aunque la incidencia del 100 % de la roya café en la variedad CC 93-7711 sigue siendo relevante, ya que, a niveles altos de enfermedad, la taza fotosintética del cultivo puede verse comprometida y tener un efecto potencial directo sobre el rendimiento y la calidad de los jugos. Es importante resaltar que, para determinar un valor específico sobre el rendimiento, sería necesario realizar un seguimiento desde el establecimiento del cultivo con esta variedad hasta la cosecha; los valores acá reportados corresponden a un momento único del cultivo.

Las variedades RD 75-11 y CC 01-1940 presentaron alta prevalencia de roya naranja (incidencia entre el 30 y el 100 % y severidad entre el 11 y el 51 %); esto cobra gran relevancia si se tiene en cuenta que el primer material cuenta con una importante proporción de área sembrada y cosecha en la región de estudio (cerca del 80 %) y que el segundo es considerado como una variedad altamente promisoria y que está siendo adoptada en esta zona productora de panela. Los factores abióticos determinantes para este resultado fueron los siguientes: altitudes entre 1.602 y 1.987 m, temperaturas promedio entre 17 y 19 °C, humedad relativa promedio entre el 85 y el 87 % y brillo solar entre 1.885 y 1.917 h. La roya naranja es reportada como una de las enfermedades limitantes del cultivo por su fácil diseminación y rápida taza de colonización. En consecuencia, los valores acá consignados indican que es necesario realizar un monitoreo constante para llegar a determinar el efecto directo sobre el rendimiento.

Las variedades RD 75-11 y CC 93-7711 se relacionaron con una alta prevalencia de mancha de anillo (incidencias entre el 30 y el 100 % y severidades del 11 al 51 %), especialmente en predios con altitudes entre 1.602 y 1.987 m, temperaturas de 20 a 23 °C, volúmenes de precipitación entre 2.265 y 2.446 mm, humedad relativa entre el 75 y el 84 % y brillo solar de 1.918 a 2.201; en contraste, la variedad CC 01-1940 presentó menor afectación de esta enfermedad, con incidencias y severidades inferiores al 25 %.

La tolerancia de los materiales RD 75-11, CC 93-7711 y CC 01-1940 a mancha de ojo y muermo rojo estuvo asociada a características ambientales diferenciales en comparación con otras enfermedades reportadas en esta investigación.

La identificación del virus de la hoja amarilla, su positividad del 83 % en la variedad CC 01-1940 y su asociación con las características ambientales de la zona de producción de caña de azúcar para panela de Santander y Boyacá sugieren la necesidad de implementar actividades de monitoreo y ampliar la evaluación de esta enfermedad y sus posibles medios de diseminación,

especialmente en nichos de producción que presenten factores abióticos en los siguientes rangos: altitudes entre 1.418 y 1.591 m, temperaturas entre 17 y 19 °C, volúmenes de precipitación entre 1.931 y 2.021 mm y humedad relativa entre el 85 y el 87 %.

Este estudio presenta la problemática fitosanitaria en un momento específico, y sus resultados no corresponden a un monitoreo a través del tiempo. Es importante resaltar que en las muestras colectadas en campo no se encontró presencia de enfermedades de tipo bacteriano, como raquitismo de la soca o escaldadura de la hoja. No obstante, se brinda información importante que podría aportar al diseño de programas de manejo integrado de enfermedades en el sistema productivo de caña de azúcar para la producción de panela.

Agradecimientos

La información que se presenta en este capítulo fue obtenida en la fase 1 del proyecto "Estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades asociadas a cultivos de caña de azúcar en regiones productoras de panela en Colombia", financiado con recursos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y ejecutado por AGROSAVIA. Se extiende un especial agradecimiento a los productores de caña de azúcar para panela, quienes permitieron el ingreso del equipo técnico a sus predios para adelantar esta investigación. A Cenicaña, y en especial al doctor Juan Carlos Ángel Sánchez, por su apoyo en el desarrollo de esta iniciativa de investigación a través del acceso a imágenes fotográficas y metodologías de identificación de las enfermedades en campo, así como en la detección de virus y bacterias. Al investigador máster de AGROSAVIA Gustavo Araujo Carrillo, por facilitar el acceso a los datos climáticos de calidad del repositorio del proyecto Reducción del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático de AGROSAVIA, que provienen del Ideam, así como por su aporte en la elaboración de la cartografía presentada en este trabajo.

Referencias

Aday-Díaz, O. de la C., Montalván Delgado, J., Delgado Padrón, J., Puchades Izaguirre, Y., Rodríguez Lema, E. L., & Alfonso Terry, I. (2020). Orange rust disease progress in different plantation cycles of sugarcane in Cuba. *Sugar Tech*, *22*, 1.057-1.062. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00843-w

Agnihotri, V. P. (1990). *Diseases of sugarcane and sugarbeet*. Oxford & IBH Publising.

Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology* (5.ª ed.). Academic Press.

Aigang, L., Tianming, W., Shichang, K., & Deqian, P. (2009). On the relationship between latitude and altitude temperature effects. En IEEE (Ed.), *2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology* (pp. 55-58). https://doi.org/10.1109/esiat.2009.335

Ángel, J. C., Cadavid, M., & Victoria, J. I. (2010a). Incidencia de roya café (*Puccinia melanocephala*) en variedades de caña de azúcar en el valle del río Cauca, 2007-2010. *Carta Trimestral*, *32*(3-4), 37-38. https://www.cenicana.org/pdf_privado/carta_trimestral/ct2010/ct3y4_10/ct3y4_10_p37-38.pdf

Ángel, J. C., Cadavid, M., & Victoria, J. I. (2010b). *Presencia de roya naranja* (Puccinia kuehnii) *en el Valle del Cauca y estrategias para su manejo* [documento de trabajo n.º 715, primer informe de avance]. Cenicaña.

Ángel Sánchez, J. C., Cadavid Ordóñez, M., & Ángel Calle, C. A. (2016). *Reconocimiento de las enfermedades de la caña de azúcar en Colombia. Guía metodológica*. Cenicaña.

Barrera, W., Hoy, J., & Li, B. (2012). Temperature and leaf wetness effects on infection of sugarcane by *Puccinia melanocephala*. *Journal of Phytopathology*, *160*(6), 294-298. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2012.01904.x

Barrera, W., Hoy, J., & Li, B. (2013). Effects of temperature and moisture variables on brown rust epidemics in sugarcane. *Journal of Phytopathology*, *161*(2), 98-106. https://doi.org/10.1111/jph.12035

Cardozo Burgos, C. (2017). *Estimación de niveles de resistencia al virus de la hoja amarilla (SCYLV) mediante la técnica de PCR en tiempo real (RT-qPCR) en variedades de caña de azúcar* [tesis de doctorado,

Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59467

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña]. (2023, 18 de enero). Servicio de diagnóstico de enfermedades. https://www.cenicana.org/servicio-de-diagnostico-de-enfermedades-2/

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (2015). *Informe final del producto 1. Departamento de Santander, proyecto Reducción del Riesgo de Adaptación al Cambio Climático* [documento interno].

Guzmán, M. L., & Victoria, J. I. (2001). Servicio de diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar. *Carta Trimestral*, *23*(1), 17-19. https://www.cenicana.org/pdf_privado/carta_trimestral/ct2001/ct1_01/ct1_01_p26-30.pdf

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2019). *Alerta temprana fitosanitaria: roya naranja de la caña de azúcar y panelera en Colombia. Alerta amarilla* [Boletín n.º 10]. http://www.ica.gov.co/multimedia/swf/revistavirtual/2015/alerta10.pdf

Insuasty Burbano, O., & Manrique Estupiñán, R. (1997). *Reconocimiento de enfermedades en caña panelera* (Saccharum officinarum) *en el sur del departamento de Santander.* Corporación Colombiana de Investigacion Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/21116

Kaiser, W. J., Ndimande, B. N., & Hawksworth, D. L. (1979). Leaf-scorch disease of sugarcane in Kenya caused by a new species of *Leptosphaeria. Mycologia*, *71*(3), 479-492. https://doi.org/10.1080/00275514.1979.12021031

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (s. f.). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) 2007 a 2018.* https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge/data

Osorio, G. (2007). *Manual técnico buenas prácticas agrícolas y buenas prácticas de manufactura en la producción de caña y panela.* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); MANA; Corporación Colombiana de Investigacion Agropecuaria (Corpoica).

Ovalle, W. (2018). *Guía para la identificación de enfermedades de la caña de azúcar.* Cengicaña. https://cengicana.org/files/20180323162522444.pdf

Pekarcik, A. J., & Jacobson, A. L. (2021). Evaluating sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari* (Hemiptera: Aphididae), population dynamics, feeding injury, and grain yield among commercial sorghum varieties in Alabama. *Journal of Economic Entomology*, *114*(2), 757-768. https://doi.org/10.1093/jee/toab013

Prusky, D., Freeman, S., & Dickman, M. B. (2000). Colletotrichum: *Host specificity, pathology, and host-pathogen interaction.* Amer Phytopathological Society.

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Murcia Pardo, M. L. (2014). *Variedades de caña de azúcar empleadas para la agroindustria panelera de Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://hdl.handle.net/20.500.12324/12621

Rangel, M. P., Tabares, E., Lentini, Z., Tohme, J., Mirkov, E., Victoria, J., & Angel, F. (2002). Transformación de plantas de caña de azúcar susceptibles al síndrome de la hoja amarilla. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *4*(1), 54-60. https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/30090

Sanjel, S., Chaulagain, B., Small, I. M., Comstock, J. C., Hincapie, M., Raid, R. N., & Rott, P. (2018). Comparison of progress of brown rust and orange rust and conditions conducive for severe epidemic development during the sugarcane crop season in Florida. *Plant Disease*, *103*(5), 825-833. https://doi.org/10.1094/PDIS-05-18-0862-RE

Saumtally, A. S., & Sullivan, S. (2000). Brown spot. En P. Rott, R. A. Bailey, J. C. Comstock, B. J. Croft, & A. S. Saumtally (Eds.), *A guide to sugarcane diseases* (pp. 77-80). Cirad; ISSCT.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, *9*, 671-675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

Tarazona Parra, G. A. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera: medidas para la temporada invernal.* Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). https://www.ica.gov.co/getattachment/6a54658e-1723-488d-a7ab-2f4baad793cb/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-cana-panele.aspx

Van Rensburg, N. J. (1973). Notes on the occurrence and biology of the sorghum aphid in South Africa. *Journal of the Entomological Society of Southern Africa*, *36*(2), 293-298. https://hdl.handle.net/10520/AJA00128789_3446

Victoria, J. I., Guzmán, M. L., & Ángel, J. C. (1995). Enfermedades de la caña de azúcar en Colombia. En Cenicaña (Ed.), *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 265-293). https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf

Victoria, J. I., Guzmán, M. L., Cuervo, E., & Lockhart, B. (1999). Síndrome de la hoja amarilla en Colombia. *Serie Divulgativa Cenicaña*, (7). https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_divulgativa/sd_07/sd_07.pdf

Viswanathan, R. (2021). Red rot of sugarcane (*Colletotrichum falcatum* Went). *CABI Reviews*, *16*(23), 2-57. https://doi.org/10.1079/PAVSNNR202116023



Capítulo 5

Mapeo digital de los suelos de la región de la Hoya del Río Suárez

Viviana Marcela Varón-Ramírez, Ruy Edeymar Vargas Díaz
y Gilberto Alonso Murcia Contreras

Resumen

Conocer la oferta edáfica y su comportamiento espacial es la base del establecimiento de sistemas de producción eficientes y sostenibles. El objetivo de este estudio fue identificar la distribución espacial de nueve propiedades de suelo en zonas paneleras de la Hoya del Río Suárez (Boyacá y Santander) a partir de la exploración de técnicas geoestadísticas (regresión *kriging*) y del aprendizaje automático asistido por computadora (bosques aleatorios, máquinas de soporte vectorial y modelos ensamblados). El estudio contempló 47.204 ha en los municipios de Chitaraque, Moniquirá, Togüí, San José de Pare y Santana, en Boyacá, y Barbosa, Chipatá, Güepsa, San Benito, Suaita y Vélez, en Santander, y contó con una base de datos de 933 puntos de muestreo y un conjunto de 41 variables predictoras. Como resultados relevantes, se obtuvieron modelos de predicción con una cantidad de varianza explicada entre 0,255 y 0,519 para contenido de arcilla, densidad aparente, porosidad total, pH y capacidad de intercambio catiónico. Este estudio representa una contribución significativa para el conocimiento de la oferta edáfica y es de potencial uso para ejercicios a escala regional.

Palabras clave: geoestadística, aprendizaje de máquina, zonas paneleras

Introducción

El suelo juega un papel importante en la implementación de los planes de seguridad alimentaria, el sostenimiento de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y la generación de servicios ecosistémicos (Yang et al., 2020). El suelo es un componente de los sistemas de producción agropecuaria, y, por tanto, conocer la oferta edáfica y su comportamiento espacial es la base del establecimiento de sistemas de producción más eficientes y sostenibles (Lal et al., 2021). En Colombia, el mayor núcleo productivo de caña de azúcar para la producción de panela se encuentra en la región de la Hoya del Río Suárez (HRS) (departamentos de Boyacá y Santander), lugar con los mayores rendimientos de producción del país y con buen desarrollo tecnológico en este tipo de cadena productiva, aunque no se cuenta con estudios detallados de suelos (mapas) como herramienta para los tomadores de decisiones y la academia en la región.

Los mapas de suelo en Colombia se han realizado desde la perspectiva del mapeo convencional de suelos realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC); estos estudios, hasta el momento, han suplido la demanda de información edáfica en la región de la HRS. Sin embargo, esta información tiene diferentes limitantes de uso, pues es necesario tener un conocimiento pedológico para poder interpretar los perfiles representativos de cada unidad cartográfica de suelos y construir mapas de características de estos. Además, la escala de los estudios (1:100.000) evidentemente no representa las condiciones del suelo en áreas más pequeñas.

Atendiendo estas necesidades, el mapeo digital de suelos (MDS) ha surgido como un campo de la ciencia que se basa en la predicción de suelos a través de la construcción de modelos matemáticos y estadísticos que son capaces de explicar parcialmente los patrones de distribución de una propiedad o función de suelo en el espacio geográfico (McBratney et al., 2003). El MDS se ha realizado a través de técnicas geoestadísticas, en busca de

construir un modelo de covarianza en función de la distancia entre puntos identificados, y también se han implementado técnicas de aprendizaje automático asistido por computadora (ML, por sus siglas en inglés: *machine learning*), en las que el principal objetivo es predecir (por regresión o clasificación) el comportamiento de un suelo en un lugar dado a partir de un conjunto de covariables (Minasny & McBratney, 2016).

Diferentes trabajos han mapeado propiedades físicas y químicas de suelos a nivel global (Hengl et al., 2017), continental (Guevara et al., 2018; Zomer et al., 2017) y nacional (Malone et al., 2016; Poggio & Gimona, 2017). En Colombia se han hecho diferentes esfuerzos nacionales y regionales por construir mapas de propiedades de suelos implementando MDS. Desde el enfoque del análisis geoestadístico, Vargas Diaz et al. (2023) exploraron diferentes técnicas determinísticas y probabilísticas para mapear cinco propiedades de suelo en la HRS. A escala nacional, se han implementado modelos ensamblados de ML para predecir la textura del suelo en cinco profundidades estándar en todo el territorio continental (Varón-Ramírez, Araujo-Carrillo, & Guevara Santamaría, 2022); también se han utilizado algoritmos de ML para estimar el contenido de carbono orgánico de suelos en el sistema de páramos a nivel nacional (Gutiérrez Díaz et al., 2020) y, a escala regional, para predecir la textura y la densidad aparente en la región del altiplano cundiboyacense (Araujo-Carrillo et al., 2021). Por otra parte, se han empleado técnicas geoestadísticas para estimar el pH y bases de cambio del suelo en áreas afectadas por inundaciones (Jaramillo-Barrios et al., 2019) o en algunas áreas pequeñas de la sabana de Bogotá (Cortes et al., 2018). Sin embargo, en estos estudios no se identifica un único modelo de MDS que sea aplicable a todas las regiones, por lo que es necesario, para cada caso de estudio, explorar diferentes estrategias de construcción de modelos según el conjunto de datos disponible (Guevara et al., 2018).

En todos estos ejercicios se ha identificado el potencial de uso de las herramientas del MDS que puedan generar productos más detallados de suelos y que además sean de fácil acceso a los usuarios.

Por lo anterior, y dada la necesidad de información detallada de suelos en la HRS y la importancia de identificar el potencial del MDS, el objetivo del presente estudio fue establecer la distribución espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos de la HRS, mediante el uso de cuatro modelos (uno geoestadístico y tres de ML). Este esfuerzo por representar a través de un mapa el comportamiento de las propiedades del suelo representa un avance significativo en el conocimiento de la región. Por tanto, se recomienda el empleo de este tipo de productos en ejercicios de zonificación y evaluación de tierras, planificación y ordenamiento productivo, estimación del potencial de los suelos para la prestación de servicios ecosistémicos, entre otros.

Metodología

Muestreo

La zona de estudio comprendía 47.204 ha pertenecientes a la región de la Hoya del Río Suárez (HRS), en los municipios de Chipatá, San Benito, Suaita, Güepsa, Vélez y Barbosa, en Santander, y Santana, Chitaraque, San José de Pare, Togüí y Moniquirá, en Boyacá. En la zona de estudio se diseñó un sistema de muestreo en red rígida de 700 m, lo que implicó un muestreo cada 49 ha, para un total de 933 puntos (figura 5.1). El muestreo fue realizado en el periodo 2015-2017.

Para cada punto se tomaron muestras de suelos de entre 0 y 15 cm de profundidad, y se realizaron análisis físicos y químicos en laboratorio. Para las propiedades físicas se usaron los siguientes métodos: textura (fracción de arcilla [Ar]; arena [A]; limo [L], en %), método de Bouyoucos; densidad aparente (DA, en g/cm^3), método de anillo con volumen conocido; porosidad total (porcentaje de PT = 1 – [DA/densidad relativa]); diámetro medio ponderado (DMP, en mm), método de Yoder; y agua aprovechable (porcentaje de AA = capacidad de campo – punto de marchitez permanente), a partir de las curvas de retención de agua, con el método de las ollas de presión.

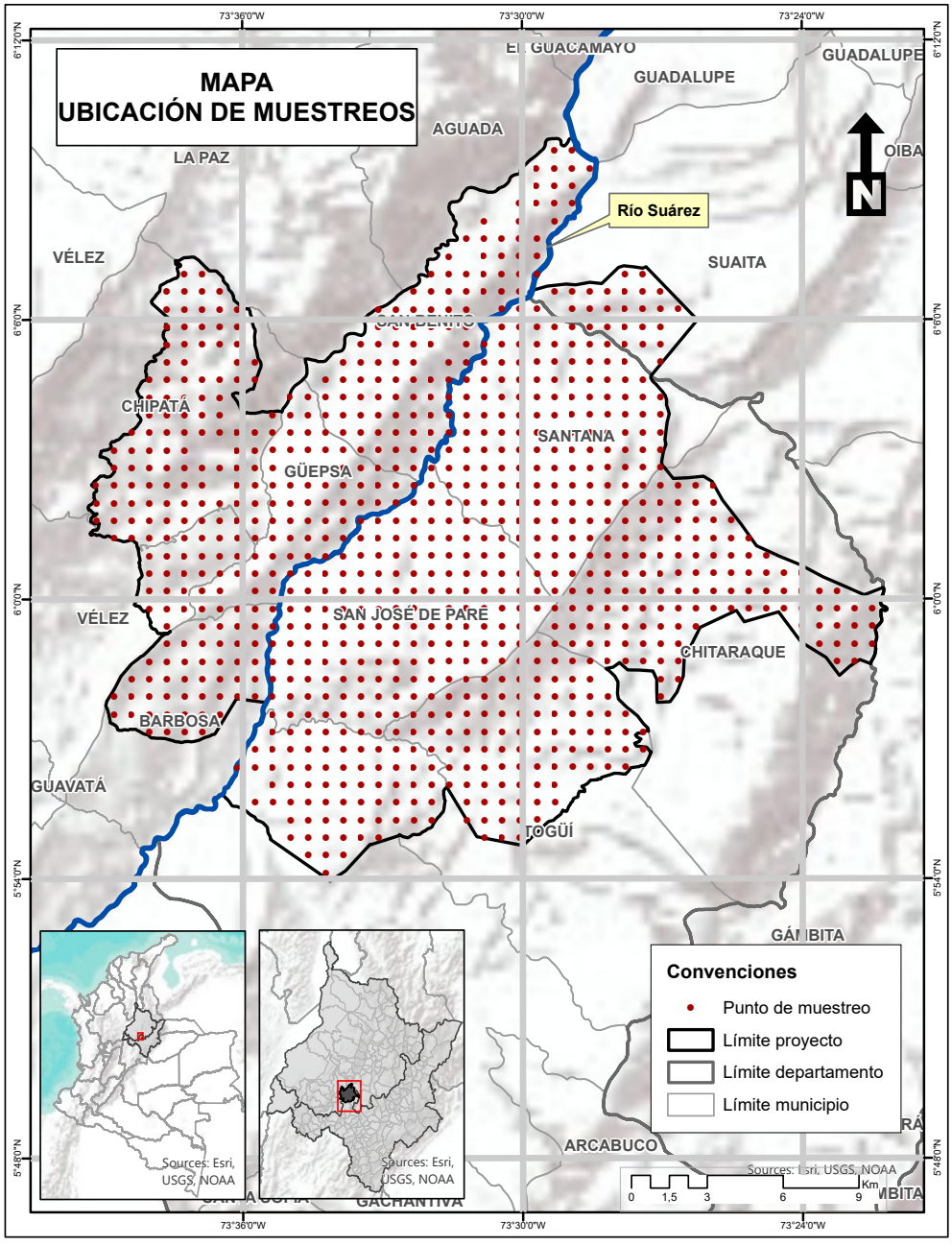


Figura 5.1. Zona de estudio y distribución de los puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

Para las variables químicas se usaron los siguientes métodos: pH, método del potenciómetro; capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE, en cmol(+)/kg), método de suma de bases intercambiables; fósforo disponible (P, en mg/kg), método Bray II; y contenido de materia orgánica (en % de MO), método Walkley-Black. En los análisis se utilizó la guía para métodos analíticos del laboratorio de suelos del IGAC (2006).

Análisis de datos

Se hizo un análisis exploratorio de datos de las propiedades físicas y químicas de los suelos para detectar la presencia de datos anómalos y atípicos; inicialmente, se descartaron los datos anómalos, y luego se analizó la relación con las otras variables. Posteriormente, se estimaron los estadísticos descriptivos básicos, como media, máximo, mínimo, asimetría, curtosis y coeficiente de variación (Warrick & Nielsen, 1980). Todos los algoritmos implementados para el análisis de datos, la construcción de modelos y su validación fueron realizados en el *software* libre R, y para cada uno de los procedimientos realizados se indica la librería usada en cada caso.

Mapeo digital de suelos (MDS)

Construcción y selección de covariables

El MDS fue basado en el modelo SCORPAN (McBratney et al., 2003), en el cual se propone predecir el comportamiento de una propiedad de suelo (S) como un resultado de la interacción entre los factores de formación propuestos por el clima (C), los organismos (O), el relieve (R), el material parental (P), la edad (A) y la relación con sus vecinos (N). Por lo tanto, fueron construidas 41 covariables para la zona de estudio; en la tabla 5.1 se muestran los grupos de covariables (binarias o continuas) que explican cada factor de formación de suelo. Las covariables fueron armonizadas a una resolución (tamaño de pixel) de 60 m; esta resolución fue establecida de acuerdo con la relación entre la cantidad de puntos de muestreo y el área de estudio (Hengl, 2006).

Tabla 5.1. Covariables predictoras según factor de formación

Factor de formación	Covariables	Fuentes
Suelo	Condición de aluminio y fertilidad*	IGAC (2003, 2005)
Clima	Precipitación media multianual (PPT, en mm)** Temperatura media anual (T_MED, en °C)** Brillo solar medio anual (BS, en h/día)** Humedad relativa media anual (HR, en %)**	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, 2017)
Organismos	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**	Google Earth Engine
Relieve	Tipos de relieve* Modelo de elevación digital (DEM)** Derivados del DEM**	IGAC (2003, 2005) Farr et al. (2007)
Material parental	Material parental*	IGAC (2003, 2005)
Edad	Orden de suelo*	IGAC (2003, 2005)

* Covariable binaria; ** covariable continua

Fuente: Elaboración propia

Para seleccionar las mejores covariables con capacidad de predecir cada una de las propiedades de suelo, se implementó una selección recursiva de variables (RFE) de la librería *caret* (Kuhn, 2020). Este algoritmo construye diferentes modelos con subconjuntos de covariables en los cuales se identifica el error medio cuadrático (RMSE). Luego, cada covariable se clasifica según su importancia para el modelo. En cada iteración de selección de características, los predictores más importantes son retenidos y el modelo es reajustado. Finalmente, se selecciona el mejor rendimiento de cada modelo, con un número específico de covariables (Kuhn, 2020).

Modelos

El conjunto de puntos muestreado para cada una de las propiedades de estudio fue dividido en dos subconjuntos: un 75 % de los datos para entrenar los modelos, y un 25 % para hacer una validación externa. Esta selección de los conjuntos se realizó de forma aleatoria, para garantizar que la distribución de los subconjuntos tuviera el mismo comportamiento (Malone et al., 2017).

Para construir los modelos de predicción, se emplearon cuatro algoritmos: un algoritmo basado en técnicas geoestadísticas (regresión *kriging* [RK]) (Odeh et al., 1995); dos algoritmos de ML (bosques aleatorios ensamblados [RF]) y máquinas de soporte vectorial (SVM) (Wadoux et al., 2020), y un modelo ensamblado (*ensemble*), es decir, un modelo lineal entre RF y SVM, mediante el uso de la librería *caret* (Kuhn, 2020).

Evaluación de la calidad de la predicción

Con el conjunto de datos de validación externa (el 25 % del total de los datos), se determinaron los siguientes parámetros de bondad de ajuste: el error medio (ME); la raíz del error medio cuadrático (RMSE); la cantidad de la varianza explicada (AVE) (Kempen et al., 2010); el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) propuesto por Lin (1989), que puede tomar valores entre 0 y 1, y el coeficiente de concordancia (IOA) basado en Willmott et al. (2012), que puede tomar valores de –1 a 1, siendo 1 el modelo de mejor desempeño. Por último, se identificó la distribución espacial del error de predicción haciendo uso de técnicas geoestadísticas, específicamente *kriging* ordinario (Giraldo Henao, 2006).

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los principales resultados del análisis exploratorio, con la descripción del desempeño de los modelos implementados para el mapeo de las propiedades de suelo y el

comportamiento espacial de aquellas propiedades que tienen un mejor desempeño.

Descripción de los suelos de la HRS

Los estadísticos descriptivos de las propiedades de suelo de la HRS se resumen en la tabla 5.2. Las muestras de suelo presentaron un predominio de las familias texturales francafina y fina (figura 5.2), según la clasificación de la USDA (Soil Survey Staff, 2014); valores de DMP de moderadamente estables a estables (mayores de 1,5 mm); valores de AA de medios a bajos (menores del 25 %), y valores de PT óptimos (entre el 50 y el 55 %). Las calificaciones dadas corresponden a las clasificaciones propuestas por el IGAC (2015).

En cuanto a las variables químicas, se encontraron suelos con MO alta (mayor del 5 %), teniendo en cuenta que la región se encuentra en altitudes entre 1.000 y 2.000 m s. n. m.; además, se observaron pH de extremadamente ácidos a medianamente alcalinos, valores de CICE predominantemente medios-óptimos y, finalmente, valores de P en mayor medida de medios a ideales. Las calificaciones dadas corresponden a las clasificaciones del IGAC (2015).

Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos de las propiedades de los suelos (0-15 cm) de la HRS

Propiedad	Muestra	Media	Mediana	Mín.	Máx.	DE	CV	Asim.	Curt.
Ar (%)	933	31,41	31,60	2,00	70,00	11,88	0,38	-0,15	-0,28
DA (g/cm^3)	932	1,09	1,09	0,54	1,74	0,20	0,18	-0,11	-0,25
PT (%)	931	55,70	55,60	31,92	75,36	7,17	0,13	0,03	-0,24
AA (% vol)	932	4,65	4,07	0,13	24,38	2,74	0,59	2,35	9,06
DMP (mm)	933	2,62	2,56	0,56	5,21	0,81	0,31	0,29	-0,39
MO (%)	931	6,42	5,85	0,41	18,10	2,78	0,43	1,12	1,58
pH	933	5,59	5,20	4,02	8,41	1,09	0,19	0,98	-0,19
CICE (cmol(+)/ kg)	924	13,92	10,89	0,91	53,01	9,71	0,70	1,80	3,34
P (mg/km)	898	12,01	8,74	0,13	49,72	9,79	0,81	1,62	2,40

Nota: mínimo (Mín.), máximo (Máx.), desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), asimetría (Asim.), curtosis (Curt.), Ar (arcilla), DA (densidad aparente), PT (porosidad total), AA (agua aprovechable), DMP (diámetro medio ponderado), MO (materia orgánica), CICE (capacidad de intercambio catiónico efectivo), P (fósforo disponible)

Fuente: Elaboración propia

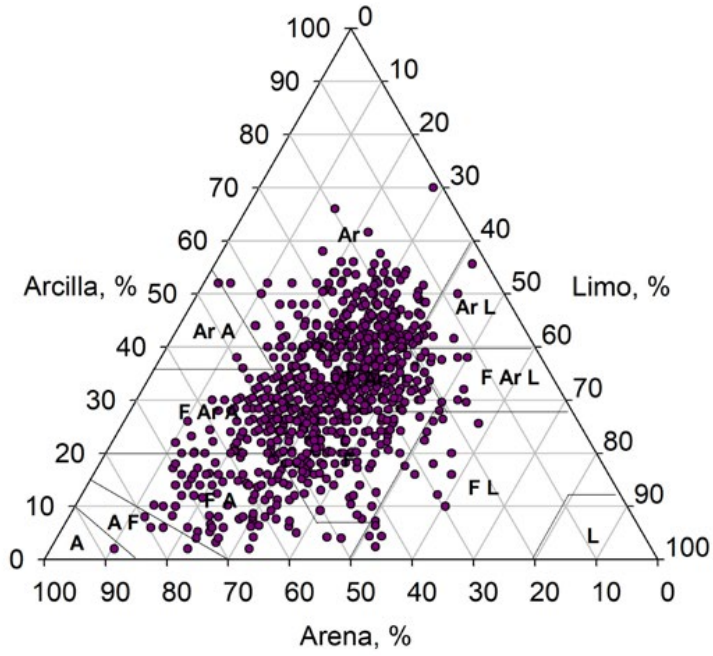


Figura 5.2. Triángulo textural de las fracciones de arcilla (Ar), arena (A) y limo (L) de los suelos de la HRS, según la clasificación de la USDA.

Fuente: Elaboración propia

Selección de covariables

En cuanto a la importancia de las variables predictoras, en la tabla 5.3 se puede observar que covariables climáticas como brillo solar, humedad relativa y precipitación fueron seleccionadas frecuentemente; además, covariables de relieve como el modelo de elevación digital (DEM) y sus derivados, que indican las distancias horizontal y vertical a la red de drenaje del área de estudio, fueron las representativas de dicho grupo de covariables. Es interesante resaltar que covariables binarias, como la presencia o ausencia de aluminio o el nivel de fertilidad, se seleccionaron con frecuencia para predecir los valores de propiedades químicas del suelo, como el pH.

Tabla 5.3. Importancia de las covariables (top 5) para las propiedades mapeadas

Propiedad	Covs.	RMSE	Top 5
Ar (%)	23	10,30	BS, DEM, HR, PPT, T_MED
DA (g/cm^3)	18	0,15	BS, PPT, NivelBaseRedCanales, DEM, HR
PT (%)	40	5,62	BS, PPT, NivelBaseRedCanales, ProfundidadValles, DEM
AA (% vol)	40	2,65	BS, DistanciaVerticalRedCanales, PPT, HR, ProfundidadValles
DMP (mm)	10	0,79	T_MAX, DEM, BS, PPT, T_MED
MO (%)	33	2,62	BS, PPT, DEM, HR, NivelBaseRedCanales
pH	39	0,74	BS, PPT, HR, Fertilidad_Baja, NivelBaseRedCanales
CICE (cmol(+)/kg)	30	7,61	BS, Aluminio_Alto, PPT, Fertilidad_Baja, HR
P (ppm)	39	9,83	ProfundidadValles, DEM, T_MED, NivelBaseRedCanales PosiciónRelativaPendiente

Nota: número de covariables seleccionadas para la construcción del modelo de predicción (Covs.), error medio cuadrático final de las predicciones realizadas con las covariables seleccionadas (RMSE), arcilla (Ar), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), agua aprovechable (AA), diámetro medio ponderado (DMP), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), fósforo disponible (P). Las covariables NivelBaseRedCanales, ProfundidadValles, DistanciaVertical RedCanales y PosiciónRelativaPendiente corresponden a derivados del DEM

Fuente: Elaboración propia

Calidad de las predicciones

En la tabla 5.4 se pueden observar los parámetros de bondad de ajuste obtenidos mediante una validación externa (el 25 % del conjunto de datos) para cada modelo entrenado. Con color naranja se indican los modelos seleccionados para representar la distribución espacial de cada propiedad de suelo y los modelos con mejor desempeño para cada parámetro.

Tabla 5.4. Parámetros de bondad de ajuste para cada modelo entrenado en cada propiedad de estudio

Propiedad	Modelo	ME	RMSE	AVE	CCC	IOA
Ar (%)	RK	**0,057**	10,494	0,226	**0,408**	0,561
	RF	-0,512	**10,300**	**0,255**	0,407	0,567
	SVM	-0,354	10,669	0,200	0,379	0,561
	Ensemble	-0,512	**10,300**	**0,255**	0,394	**0,568**
DA (g/cm^3)	RK	0,015	0,158	0,267	0,524	0,579
	RF	**0,006**	**0,152**	**0,326**	**0,551**	**0,598**
	SVM	0,011	0,161	0,241	0,512	0,577
	Ensemble	0,014	0,157	0,281	0,519	0,584
PT (%)	RK	-0,429	5,620	0,348	0,542	0,603
	RF	-0,485	**5,408**	**0,397**	**0,577**	**0,614**
	SVM	**-0,234**	5,546	0,365	0,564	0,605
	Ensemble	-0,542	5,584	0,359	0,532	0,605
AA (% vol)	RK	-0,533	**2,581**	**0,022**	**0,223**	**0,511**
	RF	**-0,042**	2,624	-0,010	0,150	0,501
	SVM	-0,700	2,730	-0,094	0,098	0,499
	Ensemble	-0,233	2,587	0,018	0,112	0,508
DMP (mm)	RK	-0,104	0,762	0,021	0,142	0,509
	RF	**-0,052**	**0,745**	**0,063**	**0,175**	**0,519**
	SVM	-0,085	0,755	0,039	0,154	0,518
	Ensemble	-0,066	0,747	0,058	0,116	0,519
MO (%)	RK	-0,292	2,512	0,083	0,236	0,532
	RF	0,240	**2,424**	**0,146**	**0,257**	0,525
	SVM	-0,247	2,462	0,119	0,257	**0,532**
	Ensemble	**0,098**	2,433	0,145	0,224	0,526

Continúa

Continuación tabla 5.4

Propiedad	Modelo	ME	RMSE	AVE	CCC	IOA
pH	RK	-0,110	0,750	0,468	0,655	0,663
	RF	0,023	**0,713**	**0,519**	**0,691**	0,669
	SVM	-0,053	0,761	0,453	0,678	0,651
	Ensemble	**0,005**	0,717	0,510	0,693	**0,672**
CICE (cmol(+)/kg)	**RK**	-1,006	**6,416**	**0,407**	0,583	**0,639**
	RF	0,845	6,607	0,371	**0,605**	0,618
	SVM	-0,621	6,507	0,390	0,582	0,634
	Ensemble	**0,695**	6,541	0,381	0,596	0,613
P (ppm)	RK	-2,523	9,318	-0,019	**0,110**	**0,541**
	RF	0,537	9,439	-0,045	0,038	0,483
	SVM	-2,722	**9,440**	-0,046	0,099	0,535
	Ensemble	**0,043**	9,136	**0,011**	0,039	0,503

Nota: arcilla (Ar), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), agua aprovechable (AA), diámetro medio ponderado (DMP), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), fósforo disponible (P), regresión *kriging* (RK), bosques aleatorios ensamblados (RF), máquinas de soporte vectorial (SVM), modelo ensamblado (*ensemble*), error medio (ME), raíz del error medio cuadrático (RMSE), varianzas explicadas (AVE), coeficientes de correlación de concordancia (CCC), coeficientes de concordancia (IOA)

Fuente: Elaboración propia

El desempeño de cada uno de los modelos evaluados es similar para cada propiedad, pues se observa que presentan RMSE y ME parecidos, condición típica en la evaluación de modelos predictivos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2018). En general, las mejores predicciones se obtuvieron con los modelos de RK y RF, y el desempeño bajo lo presentó el modelo de SVM, situación similar a la encontrada en ejercicios de mapeo en el altiplano cundiboyacense (Araujo-Carrillo et al., 2021). Para propiedades como Ar, DA, PT, pH y CICE, se obtuvieron las mejores predicciones, con AVE entre 0,255 y 0,519, CCC entre 0,408 y 0,691 e IOA entre 0,568 y 0,672. Los modelos para la predicción de propiedades como AA, DMP, MO y P presentaron un bajo desempeño, por lo que se utilizó el método de interpolación

de la distancia inversa ponderada (IDW) (Bivand et al., 2013) para representar la distribución espacial de las variables mencionadas.

Interpretación de la distribución espacial de las propiedades de suelo

En la figura 5.3 se muestra la distribución espacial de las propiedades de Ar, DA, PT, pH y CICE, empleando los modelos descritos anteriormente. Estos mapas se han representado en una paleta de color en la que los valores bajos se muestran en color morado, los valores medios en color *beige* y los valores altos en color verde. También se presenta la distribución del error de predicción, errores que se encontraron con valores positivos (en rojo) y negativos (en verde), siendo aquellas zonas rojas los sitios donde la estimación del modelo fue mayor (sobreestimación), y aquellas con color verde, los sitios donde la estimación del modelo fue menor (subestimación); las zonas amarillas se presentan como aquellos sitios donde los modelos obtuvieron los menores errores de predicción. Por otra parte, la figura 5.4 muestra la representación espacial de las demás propiedades de suelo (AA, DMP, MO y P) que no se ajustaron a un modelo predictivo.

En general, se puede observar que todas las propiedades del suelo, con excepción del P, el DMP y la MO, presentaron un comportamiento homogéneo en función de la vertiente del río Suárez. Por ejemplo, se encuentran suelos predominantemente de francofinos a finos, con mayor contenido de arcilla (Ar mayor al 35 %), en la vertiente occidental del río Suárez, y suelos de francos a francogruesos (Ar menor al 35 %) en la margen oriental del río. Debido a que, precisamente, el río Suárez corresponde al límite departamental en el área de estudio, de ahora en adelante este documento se referirá a los suelos por departamento, para facilitar la descripción.

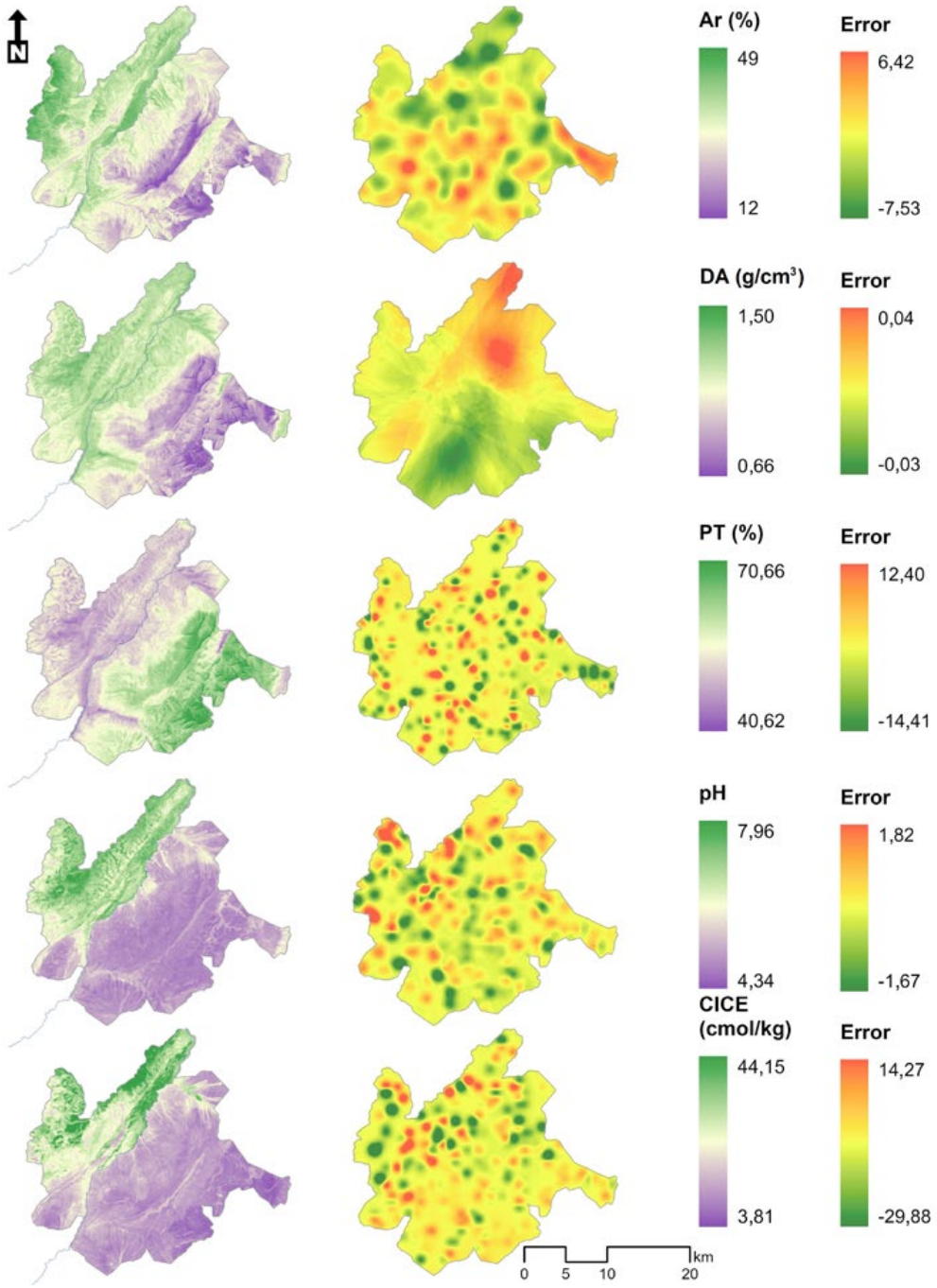


Figura 5.3. Distribución espacial y distribución del error de predicción de las propiedades de suelo en la HRS.

Nota: arcilla (Ar), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE)

Fuente: Elaboración propia

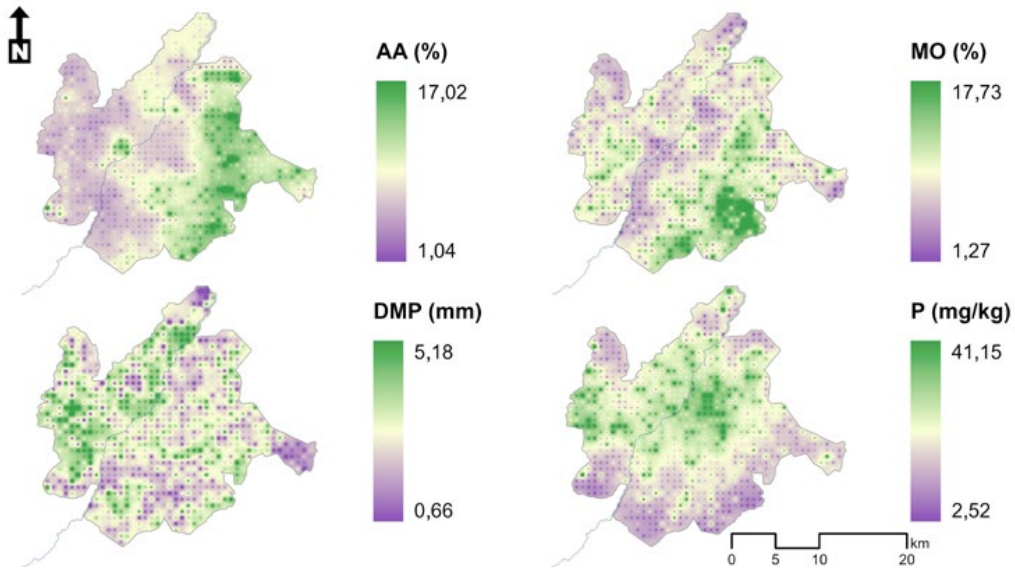


Figura 5.4. Representación gráfica mediante IDW del comportamiento de las propiedades de suelo en la HRS.

Nota: agua aprovechable (AA), diámetro medio ponderado (DMP), materia orgánica (MO), fósforo disponible (P)

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones ideales de DA para el desarrollo de la caña de azúcar se reportan entre 1,1 y 1,2 g/cm^3 (Anschau et al., 2009); en los municipios del departamento de Santander (Barbosa, Chipatá, Güepsa, San Benito, Suaita y Vélez) se obtuvieron valores de DA entre 1,0 y 1,5 g/cm^3, que están entre los rangos ideales, pero es importante tener en cuenta que aquellos sitios con DA mayores de 1,4 g/cm^3 y texturas finas pueden presentar problemas de adensamiento (Medina et al., 2011) y, por tanto, una restricción para el desarrollo radicular de las plantas de caña de azúcar (Baquero et al., 2012). Asimismo, al observar la PT con valores menores al 55 %, se confirma un proceso de disminución del espacio poroso; sin embargo, los valores de PT no alcanzan un valor crítico para el desarrollo radicular de las plantas de caña de azúcar (menores al 40 %) (Montenegro et al., 2010). En cuanto al DMP y el AA, se observa que estas propiedades tienen más zonas con valores

bajos en comparación con el departamento de Boyacá, lo que indica que estas zonas son de menor estabilidad y tienen una baja capacidad de almacenamiento de agua, por lo que son más susceptibles a procesos erosivos (Montenegro & Malagón, 1990).

En cuanto a las propiedades químicas en los municipios del departamento de Santander, el pH presentó valores entre 6 y 8, lo que indica condiciones de medianamente ácidas a moderadamente alcalinas; los valores altos de pH son contradictorios en esta zona, pues los tipos de roca reportados en estos lugares no contienen altos contenidos de calcio (rocas carbonatadas) (IGAC, 2003); sin embargo, la mayor parte de los suelos en este departamento presentaron condiciones óptimas de pH para el desarrollo de las plantas de caña (Tarazona Parra, 2011), aunque pH mayores de 7,2 pueden afectar el crecimiento y la concentración de sacarosa en el cultivo (García et al., 2007). Por otra parte, los valores de CICE para estos municipios son predominantemente mayores de 25 cmol/kg, lo que indica valores altos y adecuados (IGAC, 2015). En cuanto a MO, se encontraron valores de bajos (< 3 %) a muy altos (> 5 %), coincidiendo con los valores reportados por Manrique et al. (2000). El P no mostró un patrón acorde a la topografía, debido a que este elemento en el suelo es influenciado posiblemente por las enmiendas realizadas al suelo cuando se establecen los cultivos de caña de azúcar para la producción de panela (García et al., 2007).

Para los municipios del departamento de Boyacá (Chitaraque, Moniquirá, Togüí, San José de Pare y Santana), se observan valores de DA menores de 1 g/cm^3, e incluso, en algunos sitios de Chitaraque y Togüí, se registraron los menores valores de DA, lo cual está muy relacionado con la presencia de ceniza volcánica en algunas zonas (IGAC, 2005). Con relación a lo anterior, en estas zonas se encontró una PT alta, con valores superiores al 55 %, pues la ceniza volcánica facilita la estructuración y organización de las partículas del suelo (IGAC, 2015); sin embargo, esta condición de alta porosidad no alcanza los valores críticos (mayores al 75 %) para el adecuado desarrollo radicular de las plantas de caña

de azúcar (Montenegro et al., 2010). También para estas zonas se encontraron suelos con una mayor estabilidad de agregados (DMP), lo que indica una condición óptima de la estructura del suelo para el crecimiento de la caña de azúcar para la producción de panela, pues dicha estructura favorece el almacenamiento de agua y aire en el suelo (Osorio, 2007). Sin embargo, aun cuando en esta zona se presentaron las mejores condiciones físicas de suelo, el AA se clasifica dentro de un rango medio, lo que evidencia la necesidad de incorporar MO para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo y favorecer, así, el desarrollo vegetativo de las plantas.

En cuanto a las propiedades químicas para los municipios del departamento de Boyacá, se encontraron suelos de moderadamente ácidos a fuertemente ácidos (pH < 6), siendo estos últimos restrictivos para el adecuado desarrollo radicular del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela (Tarazona Parra, 2011); la CICE presentó valores altos-muy altos (mayores de 24 cmol/kg); se encontraron valores de MO de bajos a muy altos, y, finalmente, contenidos de P de bajos a medios para los municipios de Moniquirá, Chitaraque y Togüí, y contenidos de medios a ideales (> 20 mg/kg) en Santana y San José de Pare, para el cultivo de caña de azúcar para la producción de panela (Tarazona Parra, 2011).

En cuanto al error de las predicciones (figura 5.3), se observa que para toda el área de estudio no se presenta un patrón de sobreestimación o subestimación distintivo por departamentos o vertiente del río Suárez, con excepción de la DA, cuyas predicciones fueron sobreestimadas en los municipios de Santana, Suaita y San Benito, y subestimadas en los municipios de Togüí, San José de Pare y Moniquirá. Es importante notar que, para las propiedades de PT, pH y CICE, se aprecia una mayor área representada con color amarillo, lo que indica que los errores de predicción son bajos y brinda, así, confianza en estos productos del MDS en estas áreas (los productos del presente estudio se encuentran disponibles para libre acceso y consulta) (Varón-Ramírez, Vargas Díaz, & Murcia Contreras, 2022).

Conclusiones

A través de las herramientas del MDS, fue posible representar en el espacio las características de los suelos de la región de la HRS. Se identificó que propiedades como el contenido de arcilla, la densidad aparente, la porosidad total, el pH y la capacidad de intercambio catiónico efectivo tienen un patrón de distribución estrechamente ligado a la topografía y al material parental del área de estudio. Los modelos de regresión *kriging* y los bosques aleatorios lograron explicar la varianza de los datos; sin embargo, los modelos podrían aumentar su capacidad predictiva con la inclusión de una mayor cantidad de covariables, la exploración de otro tipo de modelos de aprendizaje de máquina o el aumento de las bases de datos de suelos. Propiedades como la estabilidad, el agua aprovechable, el fósforo disponible y la materia orgánica no demostraron correlación o dependencia con las covariables ambientales exploradas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, a AGROSAVIA y al equipo de trabajo de ejecución del proyecto "243 recomendaciones técnicas preliminares de manejo de suelos en ladera para el sistema de producción de caña panelera en la HRS".

Referencias

Anschau, R., Flores, N., Carballo, S., & Hilbert, J. (2009). *Evaluación del potencial de producción de biocombustibles en Argentina, con criterios de sustentabilidad social, ecológica y económica, y gestión ordenada del territorio. El caso de la caña de azúcar y el bioetanol* [informe técnico]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Araujo-Carrillo, G. A., Varón-Ramírez, V. M., Jaramillo-Barrios, C. I., Estupiñan-Casallas, J. M., Silva-Arero, E. A., Gómez-Latorre, D. A., & Martínez-Maldonado, F. E. (2021). IRAKA: The first Colombian soil

information system with digital soil mapping products. *Catena*, *196*, artículo 104940. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104940

Baquero, J. E., Ralisch, R., Medina, C. de C., Filho, J. T., & Guimarães, M. de F. (2012). Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxiso. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *36*(1), 63-70. https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100007

Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R* (2.ª ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2017). Modelos de Adaptación Agroclimática – MAPA. *Boletín Técnico Corpoica*, (19). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/34920

Cortes, D. L., Camacho-Tamayo, J. H., & Giraldo, R. (2018). Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*, *53*(2), 149-155. https://doi.org/10.14712/23361980.2018.15

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, *45*(2), artículo RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano Latorre, A., Santana, N. J., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13454

Giraldo Henao, R. (2006). *Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación* (1.ª ed.). Universidad Nacional de Colombia.

Guevara, M., Olmedo, G. F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., Arévalo, G. E., Arroyo-Cruz, C. E., Bolivar, A., Bunning, S., Bustamante Cañas, N., Cruz-Gaistardo, C. O., Davila, F., Dell Acqua, M., Encina, A., Figueredo Tacona, H., Fontes, F., Hernández Herrera, J. A., Ibelles Navarro, A. R., … Vargas, R. (2018). No silver bullet for digital soil mapping: Country-specific soil organic carbon estimates across Latin America. *Soil*, *4*(3), 173-193. https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018

Gutiérrez Díaz, J. S., Ordoñez Delgado, N., Bolívar Gamboa, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C., Olmedo, G., Rodríguez, L. M.,

Sevilla, V., & Vargas, R. (2020). Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas*, *29*(1). https://doi.org/10.7818/ECOS.1855

Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, *32*(9), 1.283-1.298. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, *12*(2), artículo e0169748. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2003). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Santander*.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Boyacá*.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (6.ª ed.).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2015). *Suelos y tierras de Colombia*.

Jaramillo-Barrios, C. I., Ortiz-Rico, A. F., Araujo Carrillo, G. A., & Varón-Ramírez, V. M. (2019). Establishment of homogeneous zones in a soil of alluvial origin. *Ciencia e Agrotecnologia*, *43*. https://doi.org/10.1590/1413-7054201943026318

Kempen, B., Heuvelink, G. B. M., Brus, D. J., & Stoorvogel, J. J. (2010). Pedometric mapping of soil organic matter using a soil map with quantified uncertainty. *European Journal of Soil Science*, *61*(3), 333-347. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01232.x

Kuhn, M. (2020). *Caret: Classification and regression training (R package version 6.0-85)*. https://cran.r-project.org/package=caret

Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D. J., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A. E., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G. M., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sánchez, L. B., Sandén, T., Singh, B. R., ... Zhang, J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*, *25*, artículo e00398. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398

Lin, L. I.-K. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, *45*(1), 255-268. https://doi.org/10.2307/2532051

Malone, B. P., Jha, S. K., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Comparing regression-based digital soil mapping and multiple-point geostatistics for the spatial extrapolation of soil data. *Geoderma*, *262*, 243-253. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.037

Malone, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). *Using R for digital soil mapping*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44327-0

Manrique, R., Insuasty, O., Mora, C., Rodríguez, G., Blanco, R., Mejía, L., Pinto, J., & Sandoval, G. (2000). *Manual de caña de azúcar para la producción de panela*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18504

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, *117*(1-2), 3-52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4

Medina, C., Camacho-Tamayo, J. H., & Cortés, C. A. (2011). Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Soil and Water Engineering*, *32*(1), 91-101. https://www.scielo.br/j/eagri/a/H6yXJxZXZJttJvBPdQY78Qn/?lang=en

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, *264*(parte B), 301-311. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017

Montenegro, H., & Malagón, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Montenegro, M., Ruiz, H., & Tafur, H. (2010). Tiempo de uso del suelo cultivado con caña panelera y su efecto sobre algunas propiedades físicas en Sandoná, Nariño. *Revista de Agronomía*, *27*(1), 85-92. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5104153.pdf

Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., & Chittleborough, D. J. (1995). Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: Heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, *67*(3-4), 215-226. https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00007-B

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). *Soil organic carbon mapping* (2.ª ed.). http://www.fao.org/documents/card/es/c/I8895EN/

Osorio, G. (2007). *Manual técnico buenas prácticas agrícolas y buenas prácticas de manufactura en la producción de caña y panela*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); MANA; Corporación Colombiana de Investigacion Agropecuaria (Corpoica).

Poggio, L., & Gimona, A. (2017). 3D mapping of soil texture in Scotland. *Geoderma Regional*, *9*, 5-16. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.11.003

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy* (12.ª ed.). Natural Resources Conservation Service, USDA.

Tarazona Parra, G. A. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera: medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). https://www.ica.gov.co/getattachment/6a54658e-1723-488d-a7ab-2f4baad793cb/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-cana-panele.aspx

Vargas Diaz, R. E., Galindo Pacheco, J. R., Giraldo Henao, R., Varón Ramírez, V. M., Wilches Ortiz, W. A., & Franco Florez, C. V. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la Hoya del Río Suárez (Colombia). *Siembra*, *10*(1), artículo e4118. https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4118

Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., & Guevara Santamaría, M. A. (2022). Colombian soil texture: Building a spatial ensemble model. *Earth System Science Data*, *14*(10), 4.719-4.741. https://doi.org/10.5194/essd-14-4719-2022

Varón-Ramírez, V. M., Vargas Díaz, R. E., & Murcia Contreras, G. A. (2022). Spatial soil properties distribution in "Hoya del río Suárez" region in Colombia. *Environmental Data Initiative*. https://doi.org/10.6073/pasta/4fd9a405bc7bbe2997f549d68989779d

Wadoux, A. M. J.-C., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested
solutions. *Earth-Science Reviews*, *210*, artículo 103359. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359

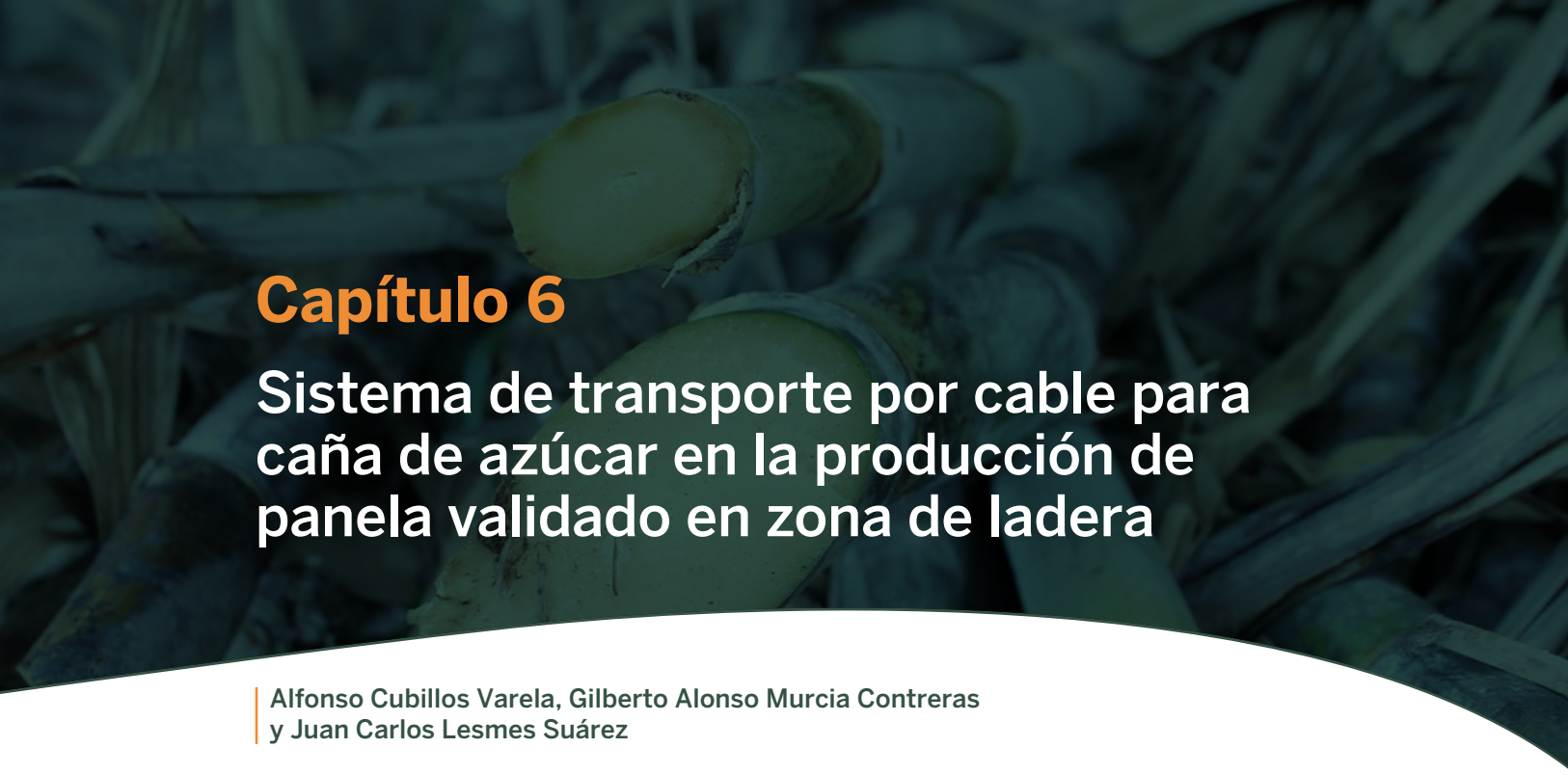
Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. En D. Hillel (Ed.), *Applications of soil physics* (pp. 319-344). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3

Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, *32*(13), 2.088-2.094. https://doi.org/10.1002/joc.2419

Yang, S., Zhao, W., Liu, Y., Cherubini, F., Fu, B., & Pereira, P. (2020). Prioritizing sustainable development goals and linking them to ecosystem services: A global expert's knowledge evaluation. *Geography and Sustainability*, *1*(4), 321-330. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.09.004

Zomer, R. J., Bossio, D. A., Sommer, R., & Verchot, L. V. (2017). Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Scientific Reports*, *7*, artículo 15554. https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8


AGROSAVIA



Capítulo 6

Sistema de transporte por cable para caña de azúcar en la producción de panela validado en zona de ladera

Alfonso Cubillos Varela, Gilberto Alonso Murcia Contreras
y Juan Carlos Lesmes Suárez

Resumen

La caña de azúcar para la producción de panela se cultiva generalmente en relieves con topografía fuertemente ondulada y ligeramente escarpada, con pendientes inferiores al 50 %, lo que restringe el empleo de tecnologías para la mecanización de las labores agrícolas. La baja mecanización resulta, finalmente, en altos costos de producción, dado que el proceso de corte y transporte de la caña desde el cultivo hasta el molino representa cerca del 30 % de los costos de producción de la panela. Por lo tanto, mediante esta investigación se desarrolló, ajustó y validó un sistema de transporte por cable aéreo (STCA) de caña de azúcar para la producción de panela en la región de la Hoya del Río Suarez (HRS). En la finca El Placer, en el municipio de Santana, Boyacá (37 ha sembradas de caña), se implementó un STCA autopropulsado, tipo monocable (portante-tractor), de movimiento continuo, que garantiza un flujo de caña del lote al trapiche de 2.600 kg/h, como mínimo, y de 3.800 kg/h, como máximo. Dadas las condiciones específicas de este predio, es posible afirmar que el STCA, combinado con el uso de mulares o animales de carga, es técnicamente factible y económicamente viable, ya que permite un ahorro de más del 12 % en los costos de transporte y una reducción del 30 % en los requerimientos de mano de obra.

Palabras clave: transporte de caña, cable aéreo, sistema autopropulsado

Introducción

En los últimos años, se han desarrollado diversos avances en la mayoría de los eslabones de la producción de panela (García et al., 2007): control de plagas, mejoramiento de las semillas, creación de hornillas más eficientes (Velásquez et al., 2019), entre otros. Aun así, el proceso de transporte de la caña de azúcar para la producción de panela desde el cultivo hasta el molino o trapiche se sigue desarrollando de forma tradicional, con el uso de animales de carga. Este sistema tradicional de transporte se ha generalizado debido, entre otras razones, al bajo costo de inversión, a la flexibilidad de operación que ofrece y a la rápida adaptación a los caminos afectados por las condiciones ambientales. A pesar de las ventajas de uso de los animales de carga, las difíciles condiciones topográficas de las zonas paneleras, muchas veces empeoradas por las lluvias y la erosión, han conllevado una serie de dificultades en las labores de carga y transporte, ocasionando, entre otras, lesiones en los mulares, mayores costos de transporte (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006), menor productividad por parte del animal (Valette & Upjohn, 2014) y, en ocasiones, la imposibilidad de llevar la materia prima para la producción de panela.

Como alternativa de transporte para la caña de azúcar para la producción de panela y otros productos agrícolas en condiciones de ladera, se utilizan los sistemas de transporte por cable. Estos sistemas son una alternativa económica y eficiente, y se pueden dividir en dos grupos, según la fuente de energía del movimiento: los sistemas por gravedad y los motorizados. Los sistemas de transporte por gravedad se utilizan para desplazar cargas que deben tomar dirección de bajada, y los sistemas motorizados se utilizan cuando la carga se desplaza hacia arriba o en dirección horizontal. Por otro lado, los sistemas de transporte por cable también se pueden clasificar según la cantidad de cables utilizados y su función: cable portante o cable tractor (Orro Arcay et al., 2003). El cable portante se encarga de sostener la carga de forma vertical, mientras que el cable tractor se encarga del

desplazamiento o carga horizontal. Los cinco tipos de sistemas de transporte por cable se describen a continuación:

- Monocable por gravedad (un cable portante): utiliza una serie de torres que sostienen un cable portante (Parra Rodríguez et al., 1989); la carga se desplaza por medio de garruchas con freno que se mueven hacia abajo (figura 6.1a).
- Tricable por gravedad (dos cables portantes y un cable tractor): en cada cable portante (de color morado y cian en la figura 6.1b) se cuelga una canastilla, mientras que el cable tractor (de color rojo) une las dos canastillas a través de una polea que se encuentra en la parte superior. La canastilla que está arriba se carga para que, al bajar por efecto de la gravedad, suba la canastilla vacía, que está en la parte de abajo (Thapa Magar, 2016).
- Monocable motorizado (un cable portante-tractor): el cable se comporta como portante y tractor al mismo tiempo. Al cable se fijan pinzas fijas o desmontables, donde se ubica la carga que se va a transportar (figura 6.2a).
- Bicable motorizado (un cable portante y un cable tractor): sobre el cable portante (de color morado en la figura 2b) se ubica una canastilla que se desplaza gracias al cable tractor (de color rojo), que se mueve gracias a un motor. También es conocido como sistema tipo tarabita (Mejia Vargas, 2011).
- Tricable motorizado (dos cables portantes y un cable tractor): se compone, como el sistema de tricable por gravedad, de dos cables portantes y un cable tractor, pero, en lugar de un freno, utiliza un motor para mover la carga en subida.

Si bien cuentan con estas ventajas, los sistemas de transporte por cable son una tecnología poco difundida, e incluso menos para el transporte de caña, debido a los altos costos de fabricación e instalación, las dificultades de diseño y los requerimientos específicos en el sector agroindustrial de la panela.

Por estas razones, el objetivo de este capítulo es presentar los resultados y una serie de recomendaciones genéricas para el

diseño, montaje y operación de los sistemas de transporte por cable aéreo (STCA) en la agroindustria panelera. Se seleccionó un predio en zona de ladera para validar la tecnología de transporte de caña de azúcar por cable aéreo para la producción de panela; luego, se realizó el diseño del sistema específico para este predio, se construyeron e instalaron los componentes del sistema, se evaluó la viabilidad económica y, finalmente, se validó el STCA.

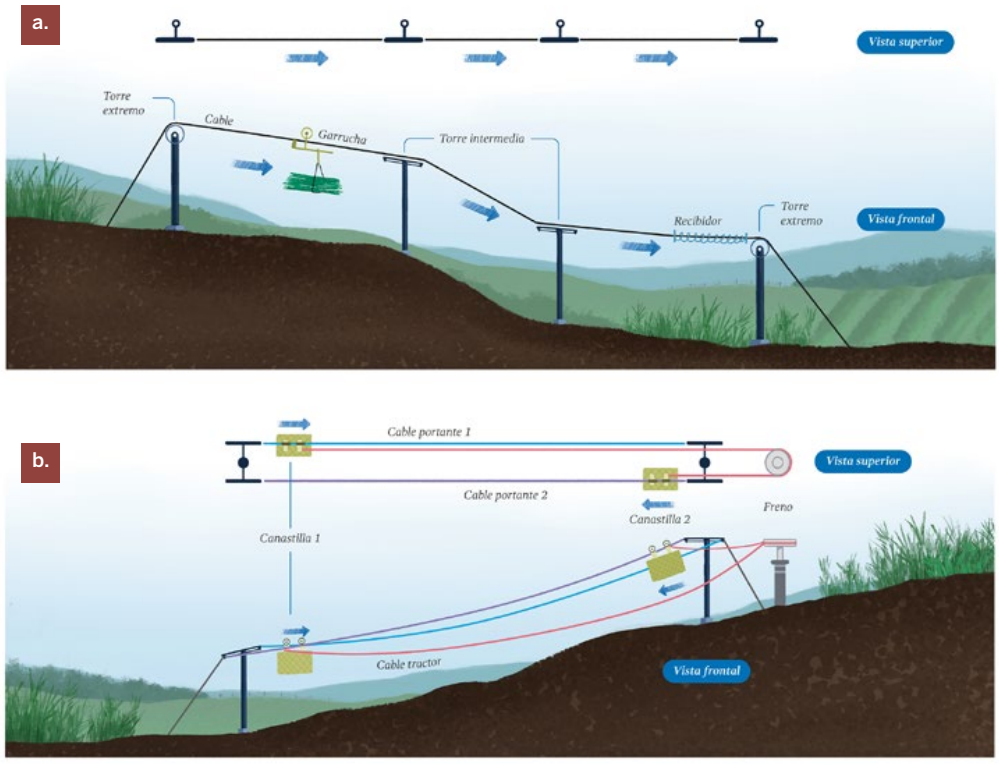


Figura 6.1. Sistemas de transporte por cable por efecto de la gravedad. a. Monocable; b. Tricable.

Fuente: Cubillos Varela et al. (2023)

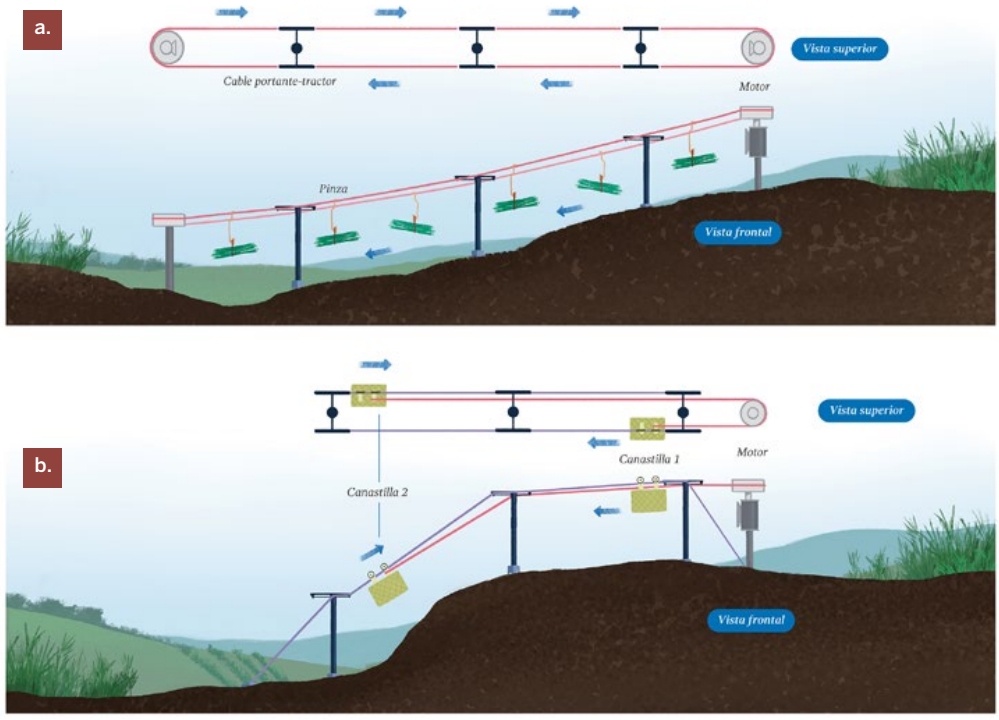


Figura 6.2. Sistemas de transporte por cable motorizados o autopropulsados. a. Monocable; b. Bicable.

Fuente: Cubillos Varela et al. (2023)

Metodología

El predio que se seleccionó para la instalación del sistema se denomina El Placer, y se encuentra ubicado en la zona de la Hoya del Río Suárez, en la vereda San Emigdio del municipio de Santana, Boyacá, a una altura de 1.750 m s. n. m.; sus coordenadas geográficas son 6° 04′ 55,6″ de latitud norte y 73° 28′ 2,9″ de longitud oeste, con una temperatura media de 18 °C y una precipitación promedio anual de 1.436 mm. La finca cuenta con un área de 36,92 ha, distribuidas en 20 lotes, con una dedicación del 98 % al cultivo de caña de azúcar, con las variedades RD 75-11 y CC 93-7711, que tienen un rendimiento promedio de 122 t de caña/ha.

Dentro de la finca El Placer se encuentran las instalaciones del trapiche para realizar el proceso de producción de panela. En el trapiche se realizan quince moliendas al año; para ello, se cuenta con un molino marca El Panelero, referencia R17, y con una hornilla con una capacidad de producción de 15.000 kg de panela por molienda, es decir, aproximadamente 142.000 kg de caña por molienda. Aunque la molienda se desarrolla en siete días (iniciando el domingo), el apronte de la caña (corte, alce y transporte) se lleva a cabo durante diez días, iniciando el miércoles antes del inicio de la molienda y terminando el viernes de la siguiente semana.

Para la implementación, validación y evaluación del STCA en el predio seleccionado, se desarrollaron las siguientes fases:

- Levantamiento topográfico del área de influencia.
- Diseño y simulación del STCA para la producción de panela
- Construcción, instalación y evaluación del STCA

Levantamiento topográfico del área de influencia

En el levantamiento topográfico realizado en la finca El Placer (figura 6.3), se encontró una topografía de carácter quebrado (Vergara et al., 2018), con pendientes del terreno del 14 al 70 %, y el trapiche está localizado en un punto central de la finca, en el mismo sitio donde se ubica el sistema motriz (figura 6.3).

Diseño del STCA

Dadas las condiciones específicas y técnicas del trapiche de la finca El Placer, como el tamaño de la finca, la topografía, el flujo de material de caña por transportar desde el campo hasta el trapiche, la distribución de los lotes y las vías, entre otras, se diseñó e instaló un STCA tipo monocable autopropulsado (portante-tractor).

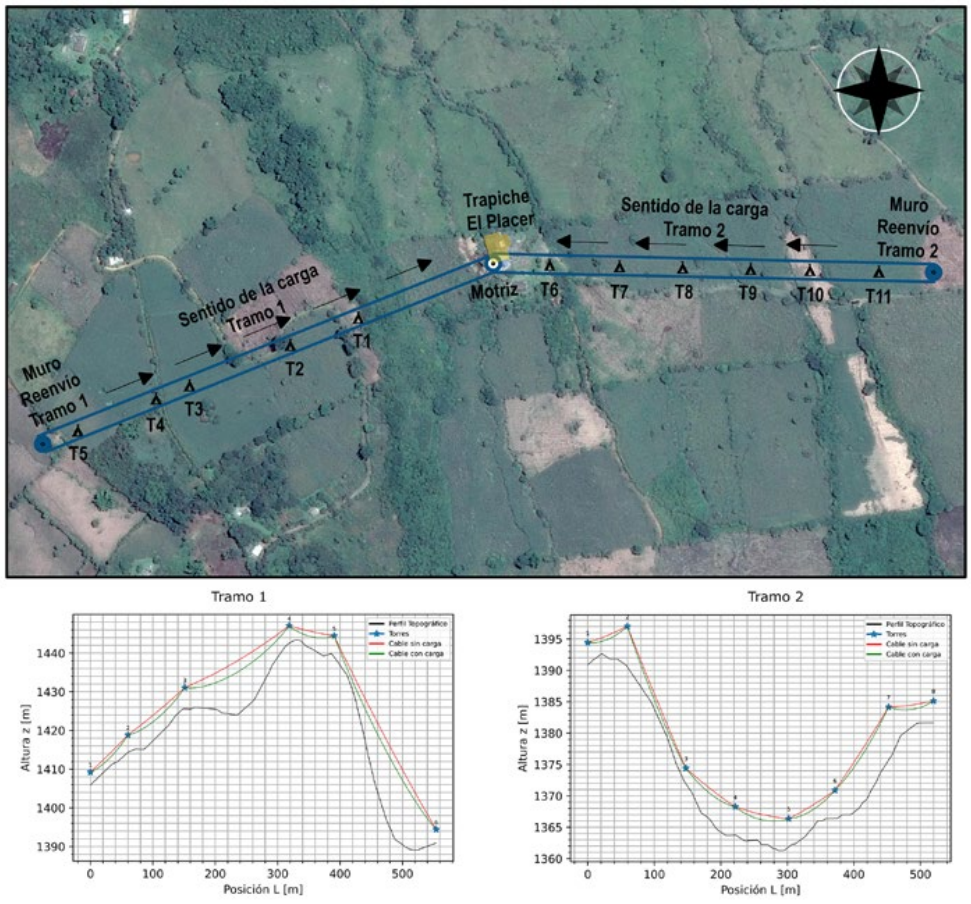


Figura 6.3. Condiciones topográficas de la finca El Placer y trazado de la línea del sistema autopropulsado con tramos.

Fuente: Elaboración propia

Como se presenta en la figura 6.3, el sistema se dividió en dos tramos, ya que las líneas de influencia del sistema difieren en su linealidad en 22,2° una de la otra. Por esta razón, la parte del trapiche hacia la izquierda, de 567,82 m de longitud, se designó como el tramo 1, y la parte del trapiche hacia la derecha, de 516,82 m, como el tramo 2, para una red total de transporte de 1.084,64 m. Con estos tramos independientes, que alimentan el trapiche desde lugares opuestos, se buscó la mayor cobertura posible del sistema en los lotes del predio.

En el diseño del STCA se definió la posición de cada una de las torres, así como la tensión, longitud y tipo de cable, la potencia del motor y los planos de detalle de cada uno de sus componentes.

Resultados y discusión

A continuación, se describen en detalle los elementos técnicos y productivos del STCA. La descripción de su funcionamiento se puede apreciar en el video publicado por AGROSAVIA TV (2019).

Construcción del STCA

El sistema posee tres estaciones (una motriz y dos de reenvío) y doce torres intermedias. El cable seleccionado, por restricciones de terreno y cálculo de catenarias, correspondió a un portante-tractor de media pulgada de diámetro (con peso unitario de 0,625 kg/m y carga de rotura de 107 kN), con 57 pinzas de carga fijas separadas cada 38,8 m, que garantizan flujos de caña entre 2.500 y 3.700 kg/h.

El motor se calculó teniendo en cuenta varios estados de carga. El caso más crítico para los requerimientos de potencia se presenta con el sistema cargado desde la estación de salida (estación motriz) hasta el punto más alto del trazado, en el sentido de ida (tramo 1), con una pendiente del cable del 40 %. Para superar ese punto, con la velocidad establecida de marcha, se requieren alrededor de 8,5 hp. Sin embargo, para mayor seguridad, se seleccionó un motor eléctrico trifásico de 15 hp, con reductor y freno de cola, el cual proporciona el movimiento, que se transmite a una polea motriz para generar el desplazamiento del cable del tramo correspondiente a operar, de acuerdo con el lote de cosecha. Es decir, si se está cosechando caña en las áreas correspondientes al tramo 1, se acciona únicamente el STCA correspondiente a este tramo, sin activar el tramo 2, y viceversa.

Las torres son los elementos que soportan los componentes de rodadura del cable portante-tractor, montadas sobre zapatas en concreto. La altura de las torres se calculó en función de la topografía del suelo, las restricciones de las vías, los obstáculos, etc. Las torres están conformadas por una columna de 3 m de altura en promedio, están construidas en tubo de acero de 6″ con 7,11 mm de espesor y se apoyan sobre zapatas de concreto de 0,5 m de profundidad y 0,7 m de diámetro (figura 6.4).



Figura 6.4. Torres intermedias de soporte del cable (color verde), pinzas y gancho de carga (color amarillo); proceso de ubicación de un paquete de caña en el gancho de la pinza.

Foto: Juan Carlos Lesmes Suárez

Las pinzas son elementos que se adhieren fijamente al cable, y sobre estas se acoplan los brazos para la carga y el transporte de los paquetes de caña, de aproximadamente 40 kg (figura 6.4). El

STCA se diseñó para soportar en cada gancho un peso de hasta 110 kg, correspondiente al peso de los 38,8 m de cable (24 kg), de la pinza y los contrapesos (10 kg) y del paquete de caña a transportar (40 kg). Por lo tanto, la pinza podría transportar hasta 76 kg de caña. En la tabla 6.1 se muestra la ficha técnica del STCA.

Tabla 6.1. Ficha técnica del STCA

Descripción	Unidad	Valor
Estaciones	Unidad	3
Número de torres intermedias del tramo 1 (altura: 2,5-5,0 m)	Unidad	5
Número de torres intermedias del tramo 2 (altura: 2,5-4,3 m)	Unidad	7
Capacidad de carga del sistema-diseño	kg/h	2.600
Cantidad de brazos de carga del tramo 1 (separados por 38,8 m)	Unidad	30
Cantidad de brazos de carga del tramo 2 (separados por 38,8 m)	Unidad	27
Velocidad de diseño	m/s (km/h)	0,71 (2,5)
Potencia del sistema motriz	kW (hp)	11,18 (15)
Cable (portante-tractor)		
Tipo	Referencia	6 x 19 EIPS A. F. Lang D.
Diámetro	Pulgadas (mm)	½ (12,7)
Cantidad de cables (bucle)	Unidad/tramo	1
Peso lineal	kg/m	0,625
Cantidad de tramos o bucles	Unidad	2
Resistencia de rotura	kg	10.250
Longitud total del cable en el tramo 1	m	1.165
Longitud total del cable en el tramo 2	m	1,043
Máxima tensión	kg	2.400
Factor de seguridad	Unidad	2,8

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de operación del STCA

Con base en las condiciones de operación del trapiche, se requieren aproximadamente 15 t de caña en 7 h, es decir, cerca de 2.150 kg de caña/h para la producción de panela por día. La velocidad del STCA se puede controlar desde 0 hasta 1,76 m/s (6,3 km/h). Sin embargo, la velocidad adecuada para que un sillero descargue suavemente el paquete de caña de la pinza en movimiento en el trapiche es de aproximadamente 0,79 m/s (2,84 km/h) (figura 6.5), con lo que se alcanza a transportar 72 paquetes de 40 kg de caña por hora, para un flujo de caña de 2.880 kg/h. Sin embargo, el sillero, una vez capacitado, puede operar el STCA a una velocidad de hasta 0,97 m/s (3,49 km/h), con lo que se alcanzan flujos de caña de hasta 3.600 kg/h, lo que permite disminuir el número de días para el apronte de la caña en el trapiche.



Figura 6.5. Descarga del paquete de caña.

Foto: Juan Carlos Lesmes Suárez

Es importante señalar que, en caso de velocidades de operación del STCA inferiores a 0,71 m/s, se genera una subutilización. De otra parte, cuando el sistema es operado a velocidades superiores a 0,97 m/s, se dificulta el enganche y la descarga de los paquetes de caña, lo que obliga a detener el sistema y genera, como consecuencia, una disminución de la eficiencia del STCA.

Otras recomendaciones para el STCA son las siguientes:

- Se debe operar en condiciones climáticas adecuadas. No se recomienda operarlo en situaciones de lluvia, debido principalmente a riesgos que pueden sufrir los operarios o silleros en la carga y descarga por la humedad en los ganchos y el sistema. En la finca El Placer no se presentan vientos fuertes que puedan alterar el funcionamiento del STCA, pero, de presentarse, se tendría que suspender su operación.
- Se requiere una apropiada relación entre el número de corteros (operarios que cortan la caña), alzadores (operarios que cargan la caña en las mulas), mulas que transportan la caña al punto de cargue y operarios que hacen los paquetes de caña.
- Se requiere la capacitación de un operario para la manipulación y enganche de los paquetes de caña, y de silleros para el apronte de caña.

Evaluación económica del STCA

El análisis realizado para las condiciones particulares de la finca El Placer muestra que, con el sistema tradicional de transporte, es necesario contratar alzadores con mulas, los cuales normalmente tienen que recorrer cerca de 2.000 m entre el lote de corte y el trapiche, por un camino destapado que permite realizar 6 viajes al día. En una molienda típica, el sistema tradicional de transporte de caña procesa 142.000 kg de caña, para obtener 15.000 kg de panela; para ello, se contratan 8 alzadores con 16 mulas, que realizan el transporte de caña por 10 días, para un total de 79 jornales de alzador (en la medición realizada, un alzador no

trabajó un día) y 158 días de mula por molienda. En promedio, una mula transporta 150 kg de caña y realiza 6 viajes por día, por lo que logra transportar 900 kg/día; así, las 16 mulas transportan en un día 14.400 kg de caña, logrando en los 10 días de apronte el objetivo mínimo de 142.000 kg de caña requeridos para la molienda. Además, se contratan 2 silleros por día durante los 10 días que dura el apronte de la caña, para un total de 20 jornales de silleros por molienda. En total, bajo este sistema tradicional, para las labores de movimiento de la caña se requieren 99 jornales por molienda (tabla 6.2).

Tabla 6.2. Costos de transporte de caña para la producción de 15 t de panela, mediante el sistema tradicional de transporte en mulas, en la finca El Placer, en Santana, Boyacá

Concepto	Unidad	Cantidad	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)	Participación (%)
Alzadores	Jornal	79	40.000	3.160.000	65,4
Mulas	Ración de comida de las mulas	158	5.500	869.000	18,0
Silleros	Jornal	20	40.000	800.000	16,6
Costo total del transporte de caña				**4.829.000**	**100**

Fuente: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, 2016)

Por su parte, la combinación del STCA con el transporte en mulas permite reducir el recorrido de las mulas a tan solo 100 m de trayecto, correspondiente a la distancia desde el lote de corte hasta el punto de carga de la caña en el STCA. De esta forma, para el mismo requerimiento de transporte de 142.000 kg de caña por molienda, se contratan solo 2 alzadores diarios, con 4 mulas, durante 8 días (tiempo en el cual se apila en el punto de carga toda la caña cortada), para un total de 16 jornales de alzador y 32 días de mula por molienda. Para el transporte de caña con el STCA, se deben emplear 3 trabajadores para armar los paquetes de caña y un trabajador para alzar y enganchar los paquetes en el

cable. La labor de transporte de caña por cable se realiza durante 9 días, lo cual implica que para cada molienda se deben contratar 27 jornales de trabajadores para armar los paquetes de caña y 9 jornales de un trabajador para el enganche de la caña en el cable. Al igual que en el sistema tradicional, se contratan 2 silleros por día, durante 9 días —tiempo de duración del apronte de la caña con este sistema—, para un total de 18 jornales de silleros por molienda. En el sistema combinado con cable y mulas se emplean en total 70 jornales por molienda en labores relacionadas con el movimiento de la caña; por tanto, este sistema combinado permite un ahorro del 29,3 % en la mano de obra requerida para estas labores (tabla 6.3), respecto al sistema tradicional, únicamente con mulas. Los costos totales de transporte de caña mediante el sistema combinado se reducen en cerca de COP 607.591 por molienda. Este ahorro representa cerca de COP 4.280 por tonelada de caña transportada, y equivale a una reducción del 12,5 % en los costos de transporte de la caña para la elaboración de panela.

Tabla 6.3. Costos de transporte de caña para la producción de 15 t de panela, mediante el sistema combinado de cable y mulas, en la finca El Placer, en Santana, Boyacá

Concepto	Unidad	Cantidad	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)	Participación (%)
Alzadores	Jornal	16	40.000	640.000	15,2
Mulas	Ración de comida de las mulas	32	5.500	176.000	4,2
Silleros	Jornal	18	40.000	720.000	17,0
Armadores de paquetes	Jornal	27	40.000	1.080.000	25,6
Enganchadores de paquetes	Jornal	9	40.000	360.000	8,5
Energía	kW/h	229	501	114.729	2,7

Continua

Continuación tabla 6.3

Concepto	Unidad	Cantidad	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)	Participación (%)
Mantenimiento				125.000	3,0
Riatas de amarre	Unidad	30	9.000	270.000	6,4
Depreciación				330.000	7,8
Financiero				405.680	9,6
Costo total del transporte de caña				**4.221.409**	**100**

Nota: Los valores pagados como jornal no incluyen los costos de alimentación. Para el caso de los alzadores, el valor incluye el alquiler de los animales de carga.

Fuente: Corpoica (2016)

Recomendaciones del STCA para pequeños y medianos productores de panela

Los pequeños y medianos productores de panela se caracterizan por cultivar caña de azúcar para panela en áreas inferiores a 50 ha, en suelos con topografía quebrada, con infraestructura vial inadecuada para el transporte de la caña y con mano de obra cada vez más escasa. Bajo estas condiciones, las recomendaciones para el diseño y montaje del STCA son las siguientes:

- Identificar el área de la finca sembrada con caña, la distribución de los lotes, las condiciones topográficas y la ubicación del trapiche en la finca, lo cual se logra con los planos resultantes del levantamiento topográfico (planimétrico y altimétrico).
- Conocer el rendimiento de producción de caña en los diferentes lotes de la finca (t/ha).
- Conocer la capacidad de producción de panela, asociada a la hornilla y el molino, para poder establecer la cantidad de caña y el tiempo de apronte, el número de días por molienda y, finalmente, el flujo de caña que se va a transportar al trapiche.

- Definir uno o más trazados de redes del STCA, según la distribución de los lotes y la ubicación del trapiche dentro de la finca, buscando la uniformidad entre las distancias de los lotes al STCA.
- Seleccionar el tipo de STCA en función del flujo de caña por transportar: para bajos flujos de caña, se recomienda un sistema monocable, y para distancias más largas, con un mayor flujo de caña por transportar, en topografías muy quebradas, se recomienda un sistema bicable.
- Seleccionar el STCA según los requerimientos de movilización: para distancias relativamente cortas, en topografías no muy quebradas, se recomienda un sistema de movimiento continuo, es decir, que gire permanentemente a una velocidad constante, y para distancias muy largas, en topografías muy quebradas, para lograr una mayor capacidad de carga, se recomienda un sistema de vaivén, es decir, en el que se desplaza una canasta de gran capacidad de carga a un extremo de la finca (por ejemplo), se llena y se regresa al trapiche para su descarga; una vez descargada la caña, el ciclo inicia nuevamente.
- Realizar un diseño mecánico estructural del STCA y de sus componentes.

Conclusiones

Dadas las condiciones específicas de la finca El Placer, se puede afirmar que la implementación del sistema de transporte de caña aéreo, combinado con el transporte tradicional en mulas, es factible desde el punto de vista técnico y económico. Desde el punto de vista técnico, se evidencia la posibilidad de ajustar este tipo de STCA para el transporte de caña en la producción de panela, cumpliendo con los requerimientos del proceso y sin afectar la calidad del producto. Por otro lado, se evidencia, desde el punto de vista económico, que el uso del STCA genera, para este caso, un ahorro de hasta el 12,5 % en los costos de transporte de caña. Igualmente, la implementación de este sistema en la finca El Placer

permitió definir una serie de recomendaciones generales para la implementación de los STCA para caña de azúcar, las cuales son de interés para la agroindustria panelera.

Agradecimientos

Agradecimiento al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en desarrollo de la agenda de investigación. Los resultados corresponden al proyecto "Sistema para el transporte de la caña por cable para producción de panela validado en zona de ladera".

Referencias

AGROSAVIA TV. (2019, 24 de julio). *Sistema de transporte de caña por cable* [video]. YouTube. www.youtube.com/watch?v=XLxzfJwLkLY

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2016). *Sistema para el transporte de la caña por cable para producción de panela validado en zona de ladera* [reporte final de meta].

Cubillos Varela, A., Lesmes-Suárez, J. C., Murcia, J. S., Murcia, S. D., Varón-Ramírez, V. M., & Santacruz, A. M. (2023). *Tecnologías de transporte por cable aéreo para condiciones de ladera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7406399

García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano Latorre, A., Santana, N. J., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/13454

Mejía Vargas, A. F. (2011). *Diseño y construcción de un sistema de transporte de carga por medio de cables para topografía de gran pendiente* [tesis de pregrado]. Universidad Eafit. https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/4442/AndresFelipe_MejiaVargas_2011.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR] (2006). *El sector panelero colombiano*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18667/43705_55394.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Orro Arcay, A., Novales Ordax, M., & Rodríguez Bugarín, M. (2003). *Transporte por cable*. Tórculo Artes Gráficas.

Parra Rodríguez, H., Álvarez Mejía, F., & Roa Mejía, G. (1989). Transporte de café cereza por cable aéreo de gravedad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *42*(2), 31-57. https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28451

Thapa Magar, R. (2016). *Gravity goods ropeways: A sustainable solution for rural transportation in hilly and mountainous regions of Nepal* [tesis de maestría]. University of Oregon. https://scholarsbank.uoregon.edu/xmlui/bitstream/handle/1794/20424/ThapaMagar_oregon_0171N_11478.pdf?sequence=1

Valette, D., & Upjohn, M. (2014). Voices from women: Working equids as 'invisible helpers'. En World Horse Welfare (Ed), *Proceedings of the 7th International Colloquium on Working Equids*.

Velásquez, F., Espitia, J., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2019). Non-centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process variables on qualities attributes of final products. *Journal of Food Engineering*, *255*, 32-40. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009

Vergara, R., Rodríguez, L., & Alarcón, Y. (2018). Estudio de caracterización de la actividad productiva del sector de la caña panelera en la Hoya del Río Suárez. *Novum*, *1*(8), 32-48. https://www.redalyc.org/journal/5713/571360729002/html/

Capítulo 7

Aptitud de uso de la tierra para el cultivo de caña de azúcar y la producción de panela en Cundinamarca: de la transformación local al mercado regional

Carlos Eduardo Ospina Parra, Douglas Andrés Gómez Latorre, Andrea Onelia Rodríguez Roa, Jhon Mauricio Estupiñán Casallas, Viviana Marcela Varón-Ramírez y Juan Carlos Martínez Medrano

Resumen

El cultivo de caña de azúcar para la producción de panela es de gran importancia socioeconómica en el departamento de Cundinamarca, en particular para la provincia de Rionegro, toda vez que dinamiza la economía local, genera empleo y retiene valor en las unidades productivas. Este capítulo tiene como fin describir el proceso para la identificación de las zonas óptimas para este cultivo en Cundinamarca. Se tomó como base la metodología de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) para la definición de los tipos de uso de la tierra en tres componentes: físico, socioeconómico y socioecosistémico. La investigación se desarrolló entre 2018 y 2019. La información se obtuvo de bases de datos oficiales y de entrevistas a los actores de la cadena de valor, y se complementó con transectos por las zonas productoras y transformadoras. En cuanto al componente físico, el estrés hídrico, la susceptibilidad a los problemas fitosanitarios y la susceptibilidad a la pérdida de suelo por erosión fueron los criterios que más condicionaron la aptitud; con respecto al componente socioeconómico, el mercado laboral y la infraestructura logística fueron los criterios que más definieron las áreas para el cultivo, y en el componente socioecosistémico, la integridad ecológica fue el criterio más relevante.

Palabras clave: resiliencia, cambio climático, biomasa, economía circular, caña panelera

Introducción

En los años setenta, la discusión pública sobre la capacidad de la agricultura para alimentar a la creciente población del planeta llevó a plantear la necesidad de instaurar una política que, por medio de una evaluación de las tierras, permitiera ordenar espacialmente la actividad agrícola, para poder generar la mayor cantidad de "biomasa", de acuerdo con la potencialidad de la tierra (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1976).

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro, Brasil, puso en el centro de la discusión el concepto de *sostenibilidad*, lo que llevó a ampliar la definición original de *evaluación de tierras* para considerar, además de la producción de biomasa, los impactos ambientales como resultado de las actividades agrícolas (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 1992). Posteriormente, el Proyecto XXI de la ONU mostró la necesidad de revisar diferentes herramientas a la luz del concepto de sostenibilidad, lo que llevó a que en 2007 la FAO (2007) hiciera público un documento técnico en el que revisa la propuesta metodológica original de evaluación de tierras y presenta una serie de consideraciones con una mirada más comprensiva que incluye, además de la capacidad del medio biofísico para generar biomasa, los servicios ambientales que se pueden generar, introduciendo las consideraciones que se deben tener del medio socioecosistémico.

En Colombia, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), tiene el mandato de orientar la política de gestión del territorio para usos agropecuarios, el ordenamiento social de la propiedad de la tierra rural y el uso eficiente del suelo con fines agropecuarios. En el cumplimiento de su mandato, hizo un convenio con la Universidad Nacional de Colombia para generar una metodología para la evaluación de tierras que fue publicada en 2014 (Aranda Camacho et al., 2014). En esta metodología se siguen las observaciones

de la FAO y se consideran, además del componente físico, los componentes socioeconómico y socioecosistémico.

El proceso de ordenación social y productiva impulsado por la UPRA está en cabeza de los departamentos, por lo que, en el trabajo adelantado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADR) de la Gobernación de Cundinamarca, se priorizaron, para iniciar este proceso, los cultivos de caña de azúcar para la producción de panela (caña panelera), fríjol voluble y plátano Dominico Hartón. En este sentido, la SADR acudió a AGROSAVIA para llevar a cabo la evaluación de tierras de estos tres cultivos. Entre tanto, AGROSAVIA revisó la metodología propuesta por la UPRA y propuso algunos ajustes en relación con 1) la definición del tipo de utilización de la tierra (TUT), que no es más que el uso específico para la evaluación de tierras en términos de la producción (Aranda Camacho et al., 2014); 2) la captura de la información, y 3) la calificación de los expertos en el proceso de jerarquización de criterios y variables de los componentes físico y socioeconómico.

La evaluación de tierras para caña panelera en el departamento de Cundinamarca se hizo a una escala de 1:100.000, considerando variables que se agrupan en criterios que hacen parte de tres grandes componentes: físico, socioeconómico y socioecosistémico, para así determinar las áreas de mayor aptitud. La información se tomó de fuentes oficiales y fue validada con actores locales, tanto institucionales como sociales, en las áreas definidas previamente como núcleos productivos de los respectivos cultivos.

En Cundinamarca, el cultivo de caña panelera se concentra en el occidente del departamento, particularmente en los municipios de Caparrapí, Útica, La Peña, Quebradanegra, Quipile, Nimaima, Nocaima, Vergara, Yacopí, Villeta y El Peñón, que conforman lo que se ha denominado el núcleo productivo del departamento. Según cifras de Agronet (s. f.), en 2019 Colombia reportó 196.988 ha sembradas, con un rendimiento promedio de 5,4 t/ha y una producción de 1.160.490 t. Cundinamarca, con un área sembrada

de 36.659 ha y una producción de 192.690 t, es el departamento con mayor área sembrada, aunque sus rendimientos están por debajo del promedio nacional.

El desarrollo tecnológico del sistema de producción es heterogéneo y está condicionado por la ubicación geográfica de las fincas, así como por aspectos socioeconómicos y culturales que inciden en el momento de implementar nuevas tecnologías (Rodríguez Borray et al., 2020). El departamento, además de tener una considerable tradición en este cultivo y en el consumo de panela, cuenta con infraestructura de centrales de mieles para la transformación en los municipios de Caparrapí, Útica y Quipile, como resultado de esfuerzos interinstitucionales hechos en los últimos años. En el núcleo productivo del departamento, el área promedio de las fincas que tienen caña panelera es de 13,1 ha, de las cuales el 67,7 % usa variedades tradicionales como POJ 2878, POJ 2714 y ZC. El cultivo se maneja en la región con poca mano de obra y pocos insumos agrícolas, y se caracteriza por sus arreglos en monocultivo y por usar el sistema de entresaque (Rodríguez Borray et al., 2020).

El propósito de este trabajo es describir el proceso metodológico desarrollado para la identificación de las zonas óptimas para el desarrollo del cultivo de caña de azúcar para panela, de manera que contribuya a una mejor comprensión de la configuración del TUT y a una deliberación pública que mejore la ordenación productiva del departamento.

Metodología

La evaluación de tierras del sistema productivo de caña panelera se realizó a través de un análisis por niveles propuesto por la UPRA (2016), y fue desarrollada entre 2018 y 2019 para todo el departamento de Cundinamarca. Estos niveles evaluaron tres componentes: físico, socioeconómico y socioecosistémico, que integraron un grupo de criterios que, a su vez, estuvieron

determinados por variables y subvariables. La metodología se basó en las directrices y guías del *Esquema para la evaluación de tierras* (FAO, 1976) y en el enfoque por etapas paralelas de integración propuesto en el documento *Evaluación de tierras: hacia un marco de referencia revisado* (FAO, 2007).

Adicionalmente, se incluyeron algunos ajustes metodológicos que comprendieron la estimación de algunas variables y criterios en los componentes físico y socioeconómico, como el estrés por déficit hídrico, el exceso hídrico, la disponibilidad de nutrientes y la tradición productiva (tabla 7.1). Estos ajustes fueron validados en mesas técnicas con miembros de la SADR de la Gobernación de Cundinamarca, la UPRA y algunos investigadores de la red de cultivos transitorios de AGROSAVIA (con conocimientos en el cultivo de caña panelera).

Mediante una evaluación multicriterio, específicamente a través del proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) (Saaty, 1994; Saaty & Vargas, 2012), se estimó el peso relativo (porcentaje) entre componentes y criterios. Para este análisis, se consultaron especialistas en el manejo del cultivo, principalmente en aspectos fisiológicos y edafológicos. El grupo de especialistas diligenció la matriz de comparación de componentes teniendo como base una escala de preferencia. Una vez realizada esta valoración, se elaboraron las capas de variables, criterios, componentes y aptitud de uso, cuyo resultado fue validado en un taller de trabajo técnico donde se hicieron ajustes a la nueva calificación con el objetivo de generar las versiones finales de las capas. Finalmente, se realizó la sustracción de las áreas que no están incluidas dentro de la capa de frontera agrícola, definida en 2018 por la UPRA.

Tabla 7.1. Componentes y criterios para la evaluación del TUT

	Componente		
	Físico	**Socioeconómico**	**Socioecosistémico**
Criterios	Condiciones climáticas	Mercado laboral	Integridad ecológica
	Estrés hídrico*	Infraestructura	Apropiación de agua
	Riesgo fitosanitario	Tradición productiva*	Variación del contenido de carbono
	Condiciones de enraizamiento	Seguridad ciudadana	Cambio de cobertura
	Exceso hídrico*	Indicadores económicos	Susceptibilidad al riesgo de incendios
	Susceptibilidad a la pérdida de suelos	Precio de la tierra rural	
	Toxicidad	Tamaño de la tierra rural	
	Disponibilidad de nutrientes*	Institucionalidad	
	Capacidad de laboreo	Condiciones de vida	

* Criterios que fueron ajustados respecto a la metodología de la UPRA

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los resultados de los componentes fueron validados en talleres participativos en cinco municipios del departamento, teniendo en cuenta los distintos tipos de aptitud. Asimismo, se hicieron transectos para la identificación de la cadena de valor *de facto* en la zona definida como núcleo productivo, en la que se realizó una entrevista semiestructurada a al menos un actor de cada uno de los eslabones de la cadena.

Resultados

Los resultados se presentan de la siguiente forma: primero, se hace una descripción del peso relativo de cada componente. Posteriormente, se esbozan los resultados de aptitud de uso para

cada uno de los componentes y los pesos relativos de sus respectivos criterios. Finalmente, se hace un análisis de TUT de caña panelera y el fujo de la panela en este. Para un conocimiento más detallado de la composición de cada uno de los componentes, se puede revisar el *Manual de interpretación. Evaluación de tipos de uso de la tierra*, elaborado por la SADR de la Gobernación de Cundinamarca (2018).

Aptitud de uso para el cultivo de caña panelera

En el panel de expertos en el sistema de caña para panela se definió, en cuanto a la importancia y priorización de cada componente, que las ofertas edáfica y climática son las de mayor restricción en el establecimiento del cultivo, por lo que el componente físico se consideró el de mayor peso, con un 71 %. El segundo componente con mayor peso fue el socioeconómico, con el 19 %, que tuvo en cuenta el mercado consolidado, que garantiza una estabilidad parcial que permite generar una tradición productiva en el territorio. Por último, el componente socioecosistémico obtuvo un peso del 10 %, en el cual el criterio de integridad ecológica fue el más relevante.

Con respecto a la aptitud de uso, para Cundinamarca se determinó un área de 626.094,6 ha con aptitud para el cultivo, lo que corresponde al 42 % del territorio total del departamento. El 4,8 % de aptitud es alta, el 13,7 % media y el 23,5 % baja. La mayor área del departamento con aptitud para el desarrollo del cultivo se localiza en la región de la vertiente oriental del río Magdalena, en los municipios de Caparrapí, La Palma, Guaduas, Útica, La Peña, Villeta, Quebradanegra, entre otros, y parte del piedemonte llanero, en los municipios de Medina, Junín, Choachí y Fómeque (figura 7.1).

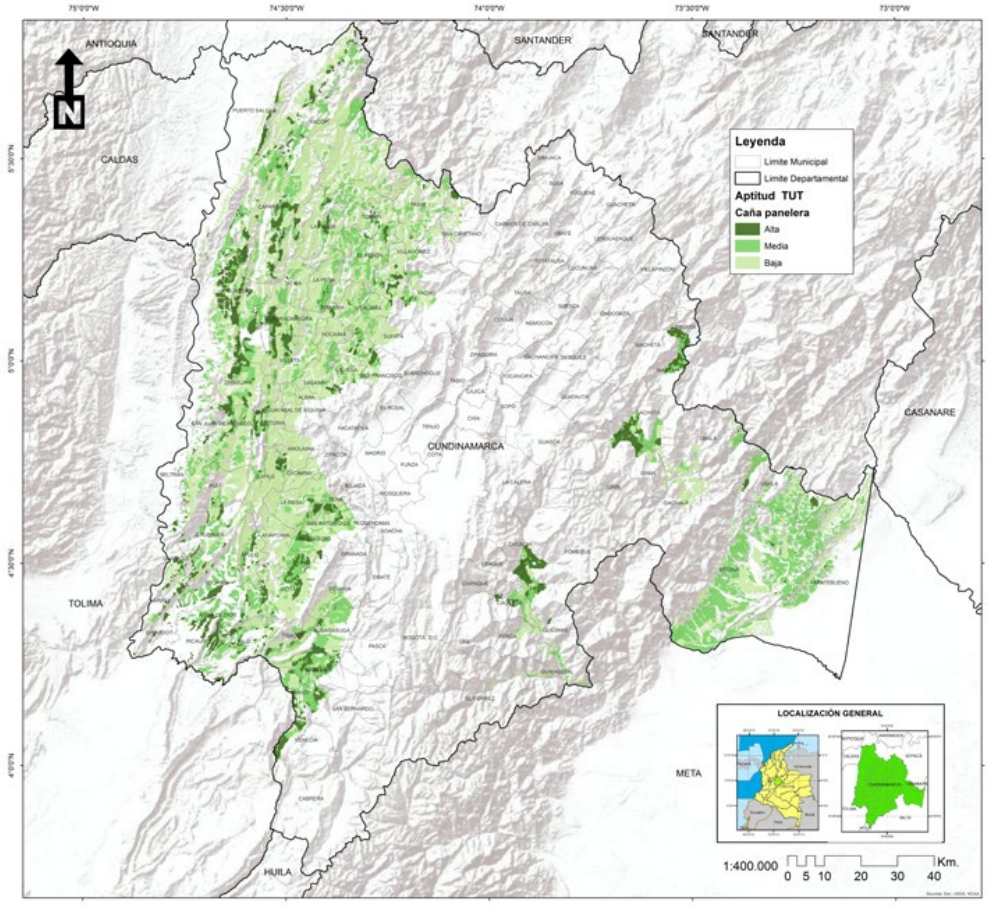


Figura 7.1. Mapa de aptitud para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia

Componente físico

El estrés hídrico y la condición climática fueron los criterios de mayor importancia para el cultivo, con porcentajes del 23,7 y el 22,0 %, respectivamente. El primero afecta considerablemente el crecimiento de hojas y tallos, la acumulación de azúcares y, por consiguiente, el rendimiento del cultivo. Las variables asociadas

a la condición climática restringen zonas donde no se puede sembrar caña; para la evaluación, se consideró que altitudes menores de 300 y mayores de 2.200 m s. n. m. no son aptas para el cultivo. Igualmente, la temperatura y la precipitación influyen en la producción de azúcar; la oscilación diaria de temperatura (entre 8 y 12 °C) es otra variable incluida dentro de la condición climática, ya que afecta la producción y la calidad de la panela.

Por otra parte, el riesgo fitosanitario tuvo una importancia del 13,1 %, a causa de las pérdidas económicas y el impacto en la productividad que tiene la presencia de plagas y enfermedades; en la evaluación se consideraron la roya naranja (*Puccinia kuehnii*) y el carbón (*Ustilago scitaminea*) como las enfermedades más limitantes del cultivo en diferentes combinaciones de temperaturas entre 25 y 30 °C y humedades relativas entre el 70 y el 90 %, lo que da como resultado categorías que favorecen en mayor o menor medida su desarrollo. En cuanto a la susceptibilidad a la pérdida de suelos por erosión hídrica, este criterio tuvo una importancia para el cultivo de caña del 10,4 %, teniendo en cuenta que Cundinamarca presenta fuertes pendientes (por encima del 25 %), donde las actividades de preparación del suelo facilitan los procesos de erosión; por lo anterior, deben incentivarse prácticas de conservación como la siembra a curvas de nivel. El exceso hídrico, por su parte, tuvo una importancia del 9 %, ya que la caña resiste excepcionalmente a condiciones de encharcamiento, por lo cual no es una limitación fuerte para el cultivo. La disponibilidad de nutrientes (8 %), la capacidad de laboreo (7 %), las condiciones de enraizamiento (5 %) y la toxicidad (3 %) son criterios relacionados con la oferta edáfica que, aunque restringen el establecimiento del cultivo, pueden ser manejados por el productor para mejorar la fertilidad. En el caso de la capacidad de laboreo, muchas de las zonas donde se cultiva caña tienen pendientes altas, pero esto no ha sido un impedimento para obtener una producción promedio de 4,9 t/ha (el promedio nacional es de 6,2 t/ha), puesto que se han venido implementando prácticas que favorecen el establecimiento del cultivo. Por otro lado, la toxicidad y la disponibilidad nutricional de los suelos son desconocidas en muchos

sitios, ya que no se realizan análisis de suelos para conocer las necesidades y establecer prácticas de manejo adecuadas. Como resultado, los municipios de Guaduas, Caparrapí, Quebradanegra, Villeta, San Juan de Rioseco, Ricaurte, Nilo, Agua de Dios, Junín, Choachí y Fómeque son los que presentan la mayor aptitud por condiciones físicas (figura 7.2).

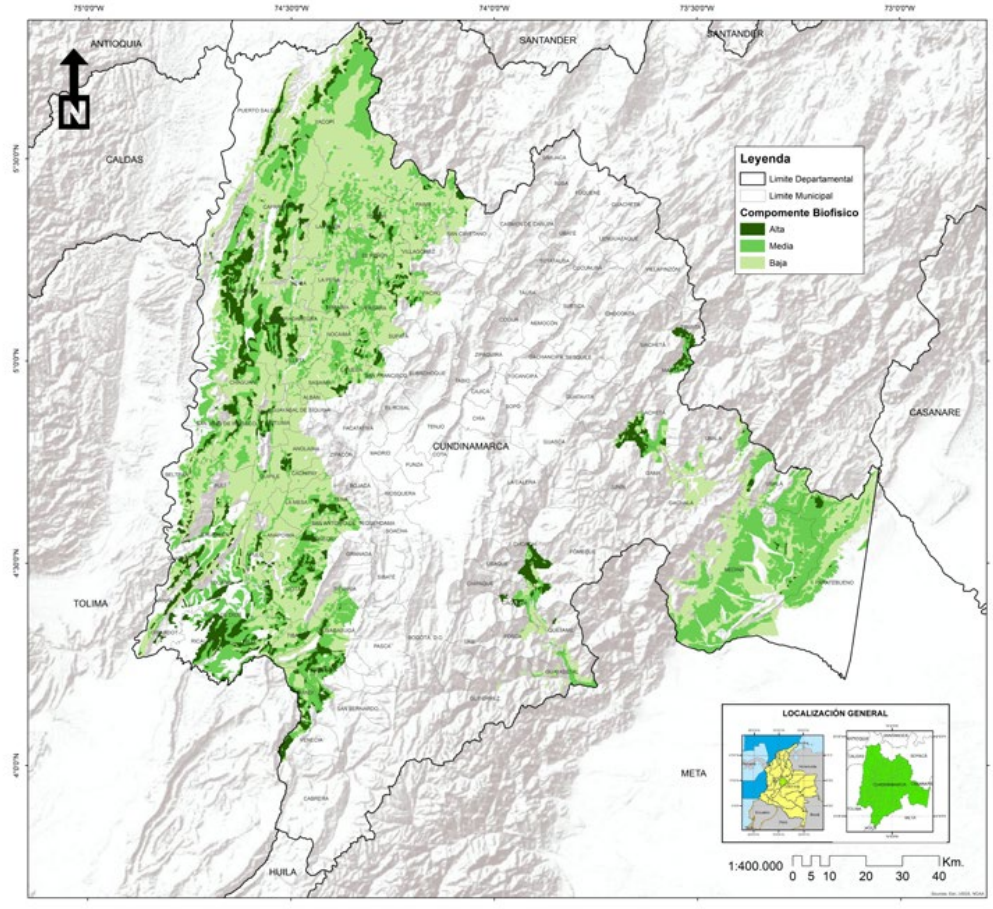


Figura 7.2. Mapa de aptitud del componente físico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia

Componente socioeconómico

Los criterios de mayor importancia en este componente son el mercado laboral y la infraestructura y logística, con porcentajes del 28,3 y el 25,4 %, respectivamente. Con relación al primero, se destaca la variable de fuerza laboral como recurso indispensable en el proceso de apropiación, puesto que, como factor de producción, el trabajo incide positiva o negativamente en los rendimientos del sistema productivo, por lo que las inversiones en este pueden favorecer o desfavorecer su desempeño. Existe consenso en cuanto a la escasez en la disponibilidad de mano de obra para el establecimiento y manejo del cultivo, así como para la transformación de la caña en panela; esto se debe a 1) la poca sostenibilidad del sector, que ha hecho que la mano de obra joven migre a otros lugares, y a que 2) la mano de obra contratada se caracteriza por ser temporal y costosa para el productor, y por tener una alta rotación. Estas condiciones no favorecen la gestión de conocimiento debido a que el empleo de jornales contratados se limita solo a la actividad comercial y no al aporte de mejoras o de fortalecimiento en las labores técnicas (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], 2017a; Gobernación de Cundinamarca, 2018).

En cuanto al criterio de infraestructura y logística, un alto porcentaje de la panela producida es comercializado mediante cadenas de intermediación para llegar al consumidor final (Corporación Colombia Internacional [CCI], 2016). Para la interpretación de este criterio, es necesario tener en cuenta los tiempos de desplazamiento desde el predio hasta los centros de servicios, comercialización y transformación. En la transformación no se incluyó la ubicación de los trapiches, ya que no se cuenta con información veraz sobre cantidad y ubicación; tampoco se incluyó la ubicación de las centrales de mieles, ya que no estaban en funcionamiento cuando se procesó la información. No obstante, es necesario destacar estos dos centros de transformación, debido al valor agregado que generan. En el caso de la central de mieles, su objetivo es homogeneizar y estandarizar el producto

final a partir de la materia prima y así comercializar los productos bajo una misma marca. El núcleo productivo cuenta con esta infraestructura en los municipios de Caparrapí y Útica.

Por su parte, los criterios de tradición productiva y seguridad ciudadana se ponderaron con los valores del 15 y el 10,3 %, respectivamente. La tradición productiva es asumida como un capital social que permite mayor conocimiento tácito y experiencia acumulada en actividades agropecuarias y en particular en el cultivo de caña, mientras que la seguridad ciudadana es el resultado del registro de los principales eventos de violencia y afectación de la seguridad a los ciudadanos en cada uno de los municipios del departamento. Para la espacialización en el cultivo, se analizaron las variables de área sembrada y existencia de cultivos en los últimos diez años. En los municipios del núcleo productivo existe una cultura panelera de más de sesenta años, lo que indica la existencia de un amplio conocimiento sobre técnicas y manejo del sistema de cultivo (Corpoica, 2017b).

El criterio de indicadores económicos se ponderó con un valor del 7,3 %; precio y tamaño de la tierra rural comparten un valor del 4,3 %, mientras que institucionalidad y condiciones de vida se ponderó en un 2,7 %. Es necesario destacar el criterio de institucionalidad, debido a que se realizaron ajustes metodológicos que llevaron a comprender mejor el impacto de la cobertura institucional. El mapa resultante del componente socioeconómico se presenta en la figura 7.3.

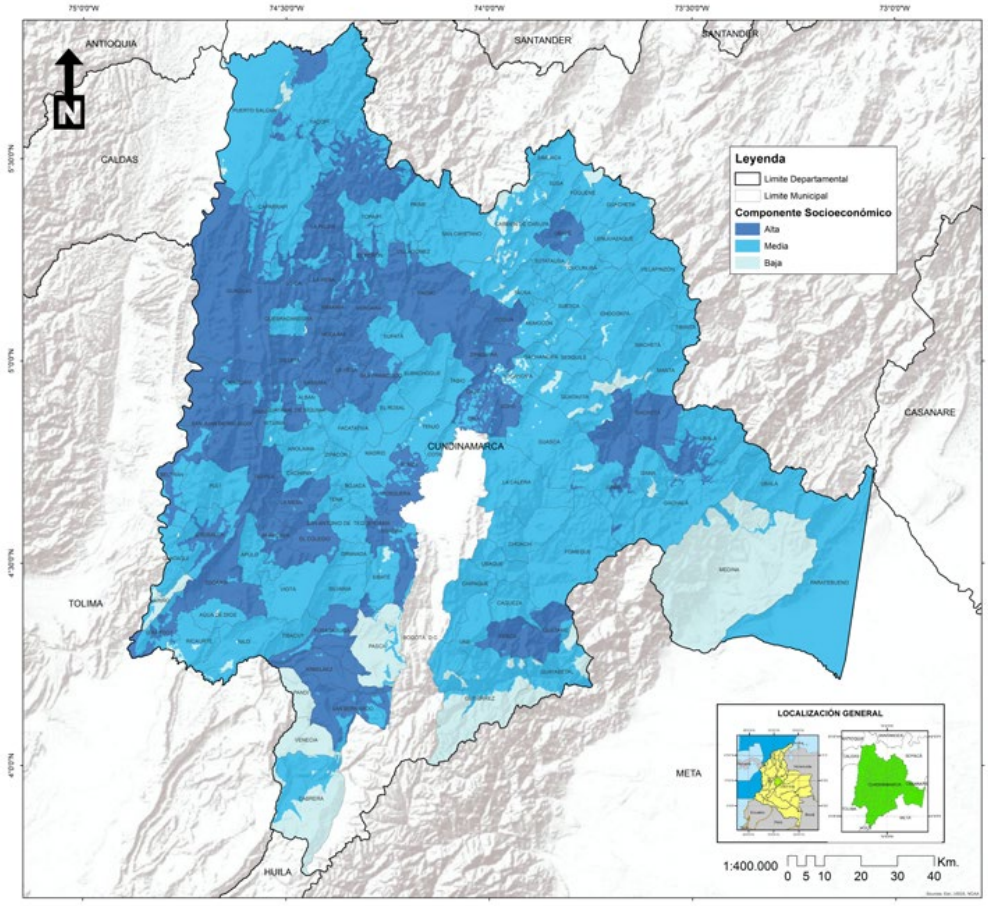


Figura 7.3. Mapa de aptitud del componente socioeconómico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia

Componente socioecosistémico

Las características socioecosistémicas de la zona complementan la oferta ambiental para el establecimiento del cultivo de caña panelera desde la visión de la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. El departamento de Cundinamarca presenta un alto porcentaje de coberturas transformadas, con presencia de algunas áreas de cobertura natural, además de que cuenta con especies animales y vegetales endémicas y con aves

en categorías vulnerables y en peligro de extinción, por lo cual es importante la conservación de estas zonas naturales y áreas estratégicas de especies sensibles. Por lo tanto, el enfoque ecosistémico que describe este componente se basó en el uso sostenible de los bienes y servicios de los ecosistemas y en el mantenimiento de la integridad ecológica, a fin de conservar el bienestar humano (Aranda Camacho et al., 2014).

Como resultado, el mapa de aptitud del componente socioecosistémico (figura 7.4) tuvo a la integridad ecológica como criterio de mayor importancia (47 %), seguido por la apropiación del agua (24,5 %), la variación del contenido estimado de carbono (13,9 %), el cambio de cobertura (9,3 %) y la susceptibilidad a incendios (5,3 %). La importancia de la integridad ecológica radica en que se enfoca en la protección de la diversidad biológica y los procesos naturales que sustentan la vida, a fin de evitar el deterioro del territorio. Este criterio está conformado por las variables de conectividad estructural de coberturas naturales, índice de naturalidad y áreas de concentración de especies sensibles; es decir, enmarca la biodiversidad y las áreas naturales, lo cual es importante para el departamento, puesto que en el 63 % del área total departamental hay áreas transformadas asociadas a la frontera agrícola.

De la misma forma, el criterio de apropiación del agua se enfoca en la sostenibilidad hídrica del territorio frente al cultivo, por lo cual es importante garantizar la disponibilidad de agua en el departamento, teniendo en cuenta la extensión agrícola que presenta. Asimismo, la dinámica de captura y emisión de carbono, explicada por el criterio de variación del contenido estimado de carbono, es esencial para la toma de decisiones, a fin de evitar un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, en aras de mantener la sostenibilidad ambiental asociada al almacenamiento de carbono. El criterio de cambio de cobertura es el único del componente que presenta exclusiones asociadas a las zonas naturales y artificiales; tales exclusiones se mantienen en la

conformación del componente, por lo cual la aptitud del territorio relacionada con el cambio de cobertura para el establecimiento del cultivo se calculó sobre las áreas de frontera agrícola.

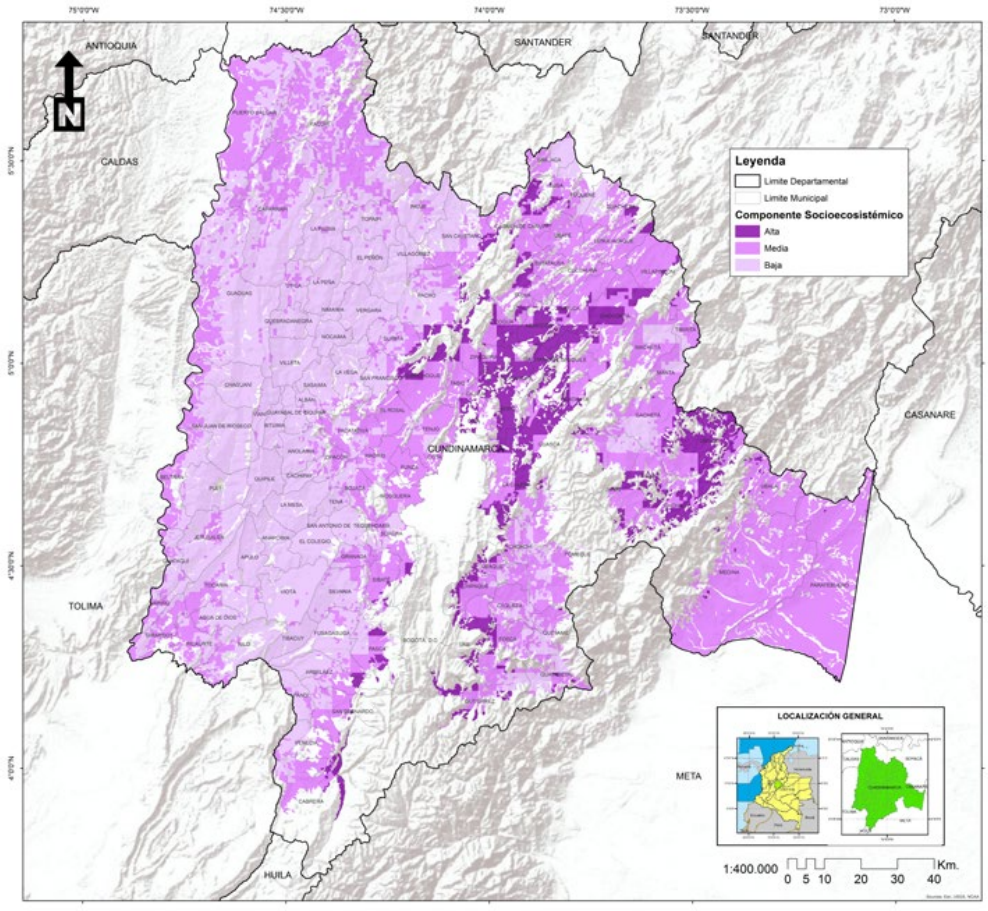


Figura 7.4. Mapa de aptitud del componente socioecosistémico para el cultivo de caña panelera en el departamento de Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia

De la transformación local al mercado regional

Con base en los componentes biofísico, socioeconómico y socioecosistémico, y en los transectos realizados por las regiones productoras de caña para panela, se mapeó la cadena de valor en el departamento de Cundinamarca, en la cual se apreciaron los principales actores, distribuidos en cinco eslabones diferenciados (figura 7.5).

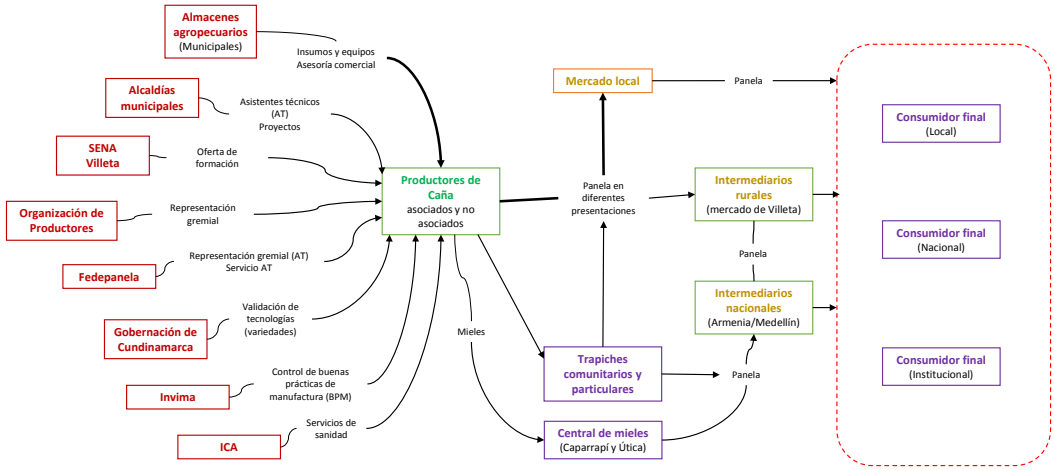


Figura 7.5. Cadena de valor *de facto* para el cultivo de caña panelera.

Fuente: Elaboración propia

El primer eslabón, la provisión de insumos y servicios, corresponde a aquellas personas, instituciones y organizaciones a las que recurren los productores, ubicadas por lo general en la cabecera de los municipios o en Bogotá. Según información recabada en los talleres de validación, la extensión rural en los municipios es apoyada por el servicio público de extensión agropecuaria: la mayoría por las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (Umata), y en algunos casos por Fedepanela, ligada generalmente a proyectos que contemplan actividades de

extensión rural con un tiempo finito y, por ende, discontinuo. El MADR y la Gobernación de Cundinamarca, por medio de sus agencias o proyectos, son actores que han posibilitado el funcionamiento de algunos trapiches. En particular, los trapiches comunitarios fueron entregados por el MADR y la Gobernación a las asociaciones legalmente constituidas, las cuales quedaron como responsables de su funcionamiento y administración; adicionalmente, la Gobernación y AGROSAVIA ofrecen procesos de transferencia de tecnología. Por su parte, el Invima regula los procesos de transformación de los diferentes productos de la panela, en función del cumplimiento de las buenas prácticas de manufactura (BPM), y el Banco Agrario presta los servicios financieros.

En el segundo eslabón, de producción primaria, sobresale la asociatividad de pequeños, medianos y grandes productores, aunque también se identifican productores no organizados que venden la caña panelera a otros productores para su transformación o hacen todo el proceso agroindustrial en sus predios de manera individual. Por ejemplo, en el municipio de Útica se encuentra la Asociación de Productores Agropecuarios de Útica (Asprut); en el municipio de Caparrapí está la Asociación de Alimentos Paneleros, y en Nocaima se encuentra la Asociación de Productores Paneleros de Nocaima (Asopropanoc). Todas estas asociaciones están legalmente constituidas, por lo que, bajo la estructura de trabajo solidario, pueden dar valor agregado al producto para comercializarlo bajo una única marca de panela, en diferentes presentaciones: panela en bloque, panela en pastilla, panela pulverizada y panela orgánica, entre otras.

La transformación, que es el tercer eslabón, se lleva a cabo en los trapiches, que son lugares donde se transforman los jugos de la caña en panela. Existen trapiches privados y comunitarios; los privados generalmente son de un solo productor, y este se encarga de prestar las instalaciones a los demás agricultores, lo que permite generar alianzas entre estos. La central de mieles constituye otro actor de transformación: es una adecuación creada en varios

municipios estratégicos del departamento, la cual es financiada por la Gobernación de Cundinamarca con el fin de potenciar los productos y subproductos generados a partir de la caña panelera para el mercado nacional e internacional.

La comercialización, que es el cuarto eslabón, se rige por acuerdos no formales, verbales y contra entrega; es decir, el intermediario le paga al productor de forma inmediata. El mecanismo de venta generalmente es igual en todos los municipios: los productores se desplazan hasta la cabecera municipal y entregan su producto al intermediario. En el caso del municipio de Villeta, se identificó que, por su proximidad geográfica y por la importancia del mercado, los intermediarios provienen de la ciudad de Bogotá; asimismo, existe el intermediario rural agropecuario, quien cuenta con bodegas en la cabecera municipal para el almacenamiento del producto de acuerdo con la dinámica del mercado local y regional.

Finalmente, el quinto eslabón está conformado por los hogares como consumidores finales de panela, los cuales dan señales de preferencia y consumo a lo largo de la cadena. Según cifras de la Federación Nacional de Productores de Panela (Fedepanela, 2021), se estima que el consumo per cápita es de 19,5 kilos, debido a la tradición arraigada en los hogares como endulzante. En el departamento de Cundinamarca, los consumidores se ubican principalmente en los municipios productores, municipios vecinos y en Bogotá.

Discusión

Este tipo de evaluaciones basadas en metodologías comprensivas dan herramientas para un análisis amplio sobre los factores para tener en cuenta a la hora de promover o incentivar determinado modelo de cultivo, en este caso el de la caña de azúcar para la producción de panela. La evaluación de tierras realizada no se basó exclusivamente en los requerimientos ambientales de la especie, sino que hace caso a una noción más integral de la

actividad agrícola, en la que se incluyen factores socioeconómicos, culturales y ambientales. El medio natural no es un espacio vacío que se llena con una actividad productiva; por el contrario, siglos de actividades de transformación y de relaciones de diversos actores han ido moldeando un paisaje que debe ser interpretado a la luz de la conveniencia o no de un determinado modelo de cultivo y de la producción de biomasa y servicios ambientales.

El sistema de cultivo de la caña panelera en el departamento de Cundinamarca ha consolidado su presencia en unas áreas que han ido marcando una tradición productiva que vale la pena conservar; sin embargo, la pertinencia de este cultivo requiere un modelo de producción más intensivo en tecnología, que focalice las áreas más adecuadas en esas regiones y minimice los impactos negativos, en particular en las zonas de alta pendiente.

Finalmente, la información obtenida en el proceso de evaluación de tierras enriquece el diálogo y la discusión entre los actores, para que, a través de mecanismos de concertación, se amplíe la base social de la cadena y se enriquezcan los procesos de ordenación territorial de acuerdo con la vocación agrícola y la sostenibilidad. En tal sentido, como herramienta de apoyo para cumplir este propósito, el *Manual de interpretación. Evaluación de tipos de uso de la tierra* (Gobernación de Cundinamarca, 2018) permite consultar el detalle geográfico de las variables y los criterios que nutren los tres componentes: físico, socioeconómico y socioecosistémico.

Conclusiones

La transformación de los paisajes naturales en el departamento de Cundinamarca es marcada y acelerada, lo que genera conflictos en las zonas de frontera entre las actividades agrícolas y de conservación. El cultivo de la caña panelera ha significado un paso en esa transformación, en las zonas de ladera frágiles, lo que ha afectado la integridad ecológica de algunas regiones

de manera significativa. Gran parte del área cultivada actual está inmersa en las áreas de aptitud determinadas; sin embargo, estas áreas están cubiertas por cultivares viejos en sistemas productivos tradicionales, los cuales deben ser sometidos a procesos de renovación. Los resultados consolidados de los tres componentes en los que se refleja el TUT permiten su incentivación en áreas tanto del occidente como del oriente del departamento, al integrar mejor las actividades de proceso, distribución y consumo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Gobernación de Cundinamarca por la financiación del convenio interadministrativo SADR-CDCVI 090 y a la UPRA por su acompañamiento en el desarrollo de dicho convenio. A las organizaciones de productores, los asistentes técnicos, los funcionarios institucionales y la comunidad en general que participaron en las actividades desarrolladas.

Referencias

Agronet. (s. f.). Estadísticas Agropecuarias. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx

Aranda Camacho, Y., Rubiano Sanabria, Y., Martínez, L. J., Restrepo, H., Mora-Motta, A., García, S., Buitrago, J., Páez, C., Gómez, D., Hermosa, M., Sarmiento, G., Díaz, C., & Ramos, A. (2014). *Metodología de evaluación de tierras 1:25000*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36445

Corporación Colombia Internacional (CCI). (2016). *Informe final: priorización de las alternativas productivas a partir del análisis de la oferta y la demanda del mercado para el departamento de Cundinamarca* [documento interno].

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2017a). *Plan de manejo agroclimático integrado del sistema productivo de caña panelera* (Saccharum officinarum, *L.*): *municipio de Útica, departamento de Cundinamarca*. https://repository.agrosavia.co/

bitstream/handle/20.500.12324/37321/Ver_Documento_372321.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2017b). *Resultados de investigación del proyecto "Evaluación de los impactos económicos y ambientales de las tecnologías de cultivo, proceso y manejo de subproductos en la agroindustria panelera" (informe final)* [documento interno].

Federación Nacional de productores de Panela [Fedepanela]. (2021, 10 de marzo). La demanda de la panela creció durante la pandemia y recuperó el nivel de precios. https://fedepanela.org.co/gremio/la-demanda-de-la-panela-crecio-durante-la-pandemia-y-recupero-el-nivel-de-precios/#:~:text=Seg%C3%BAn%20Carlos%20Fernando%20Mayorga%2C%20presidente,a%202019%20y%202018%20este

Gobernación de Cundinamarca. (2018). *Manual de interpretación. Evaluación de tipos de uso de la tierra*. http://cundinet.cundinamarca.gov.co/portal/agricultura/manual_interpretacion_evaluacion_de_tierras/index.html#home

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1976). A framework for land evaluation. *FAO Soils Bulletin*, (32). https://www.fao.org/3/x5310e/x5310e00.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2007). Land evaluation: Towards a revised framework. *Land and Water Discussion Paper*, (6). https://edepot.wur.nl/488269

Rodríguez Borray, G. A., Huertas Carranza, B., Polo Murcia, S. M., González Chavarro, C. F., Tauta Muñoz, J. L., Rodríguez Cortina, J., Ramírez Durán, J., Velásquez Ayala, F. A., Espitia González, J. J., & López Zarazá, R. A. (2020). *Modelo productivo de la caña de azúcar* (Saccharum officinarum) *para la producción de panela en Cundinamarca*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). http://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/book/48

Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, *24*(6), 19-43. https://www.jstor.org/stable/25061950

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2016). *Cultivo comercial de papa: identificación de zonas aptas en Colombia, a escala 1:100.000*. https://www.upra.gov.co/documents/10184/13821/Zonificaci%C3%B3n_papa





Componente II

Eficiencia energética, calidad y diversificación del uso de subproductos y derivados del proceso de producción de panela



Capítulo 8

Diseño y dimensionamiento de una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa mejorada

John Javier Espitia González, Fabián Andrés Velásquez Ayala, Oscar Andrés Mendieta Menjura y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

Actualmente, el proceso de combustión en la producción de panela es ineficiente en la mayoría de los trapiches que existen, por lo que se hace necesario suplir la carencia de energía con otros tipos de combustibles, y esto genera un sobrecosto de producción y un mayor impacto ambiental. El objetivo de esta investigación fue ajustar el diseño de una cámara Ward-Cimpa (150 kg de panela/h) a una menor escala de producción (90 kg de panela/h). Para cumplir con este propósito, se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de combustión de bagazo. La evaluación del prototipo de combustión se realizó considerando parámetros técnicos como la eficiencia de combustión (%), la potencia calorífica (kW) y la temperatura de combustión (°C), y parámetros ambientales como kg de CO y CO_2/h (%) y el consumo de bagazo (kg/h). Con la propuesta de cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada, se logró reducir la altura de la cámara y mantener su relación de volumen para suplir la demanda energética a una escala de producción de 90 kg de panela/h, por lo cual podría ser una alternativa técnicamente viable para sistemas tradicionales de producción de panela de pequeña escala.

Palabras clave: biomasa, bagazo, dinámica de fluídos computacional, hornilla panelera

Introducción

La energía requerida para evaporar el agua del jugo de caña de azúcar para la producción de panela se obtiene de la transformación termoquímica del bagazo. El bagazo obtenido durante la molienda de la caña de azúcar tiene el potencial para suplir la energía térmica del proceso. Sin embargo, diferentes estudios reportan que del calor suministrado a una hornilla panelera se pierde el 71,4 %, del cual el 80 % se pierde con los gases de chimenea, el 19,7 % con los inquemados y pérdidas por paredes y el 0,3 % con las cenizas (Anwar, 2010).

Con respecto al proceso de combustión en hornillas tradicionales, se han usado dos tipos de cámaras de combustión en lecho fijo: cámara plana y cámara Ward (La Madrid et al., 2016; Sánchez Castro & Mendieta Menjura, 2014). El diseño de la cámara plana es el más utilizado en las unidades de producción de panela (trapiches). Este tipo de cámaras son de forma rectangular, con un volumen de reacción limitado, que consiste en una entrada para el suministro de combustible y otra para la entrada de aire de combustión primaria. Sin embargo, este diseño se ha realizado empíricamente, sin incluir aspectos teóricos o modelos matemáticos para la combustión del bagazo (Velásquez et al., 2021). Un problema común que tiene esta cámara es el diseño del lecho de combustible, donde los procesos de secado, volatilización y oxidación del carbón se producen de manera irregular a lo largo de la parrilla. Como resultado, la formación de volátiles no es homogénea y se generan zonas enriquecidas de estos que el aire no puede oxidar por completo antes de que se liberen de la zona de combustión. Por lo tanto, se obtienen bajas temperaturas de combustión (por ejemplo, de 650-850 °C con bagazo al 30 % b. h.), tiempos de residencia inadecuados (cortos o prolongados), altas tasas de emisión de monóxido de carbono (~5 % de CO) y un consumo específico de combustible más alto (Gordillo Ariza & García Bernal, 1992).

Para resolver este tipo de problemas, se ha usado la modelación matemática y la simulación del proceso como herramientas de

diseño, lo cual ha permitido generar equipos mejorados, como la cámara Ward-Cimpa (Rodríguez et al., 2018). En contraste con la cámara plana, la cámara Ward-Cimpa tiene un volumen de reacción cuatro veces mayor, y su diseño considera una rampa de presecado, una zona de combustión primaria en un lecho fijo y entradas de aire secundario en la parte superior del lecho, para la reacción de volátiles y material no quemado (Karim & Naser, 2017). Este diseño permite alcanzar mayores temperaturas de combustión, entre 850 y 1.200 °C, con una humedad de bagazo entre el 45 y el 15 % (b. h.). Además, esta cámara disminuye las emisiones de CO al 1 % (Velásquez et al., 2021), lo que permite un incremento significativo de la eficiencia térmica y la disminución de los tiempos de residencia del jugo de caña en el proceso. Sin embargo, estas cámaras de combustión están recomendadas para capacidades de producción superiores a los 150 kg de panela/h.

Las investigaciones experimentales de este tipo de cámara de combustión revelan dificultades por el acceso limitado y la falta de homogeneidad dentro del lecho. Por tanto, la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta efectiva en este tipo de hornos, pues permite una mejor comprensión del fenómeno térmico de la conversión de la biomasa y la optimización del proceso de combustión (Gómez et al., 2015). Las técnicas de modelado de CFD han permitido analizar el rendimiento de los equipos de conversión termoquímica, pues es posible predecir variables como el comportamiento del flujo de fluidos, la transferencia de masa de calor (devolatilización y combustión), cambios de fase, entre otros (Wang & Yan, 2008).

A partir de estos estudios, ha sido posible establecer que una proporción adecuada en el suministro de aire primario y secundario, así como una mayor velocidad de inyección de este último, contribuyen a mejorar la tasa de liberación de calor en el proceso de combustión. Estos resultados tienen impactos ambientales positivos, ya que disminuyen el uso específico de bagazo y otras fuentes de combustibles contaminantes, como carbón y llantas, con lo que se reducen las emisiones (CO, CO_2,

NO_X y SO_X), los costos de producción y la deforestación en las zonas rurales cuando se utiliza leña (Rodríguez et al., 2018).

Debido a la necesidad de mejorar los procesos productivos de panela en Colombia en cuanto a la eficiencia energética y la sostenibilidad económico-ambiental, el objetivo de este trabajo fue ajustar una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa para unidades productoras de panela de pequeña escala (<100 kg de panela/h), conservando las ventajas de una cámara de combustión Ward-Cimpa.

Metodología

Se desarrolló un prototipo de cámara Ward-Cimpa mejorado para una escala de producción de 90 kg de panela/h. Se siguió la metodología de dimensionamiento de unidades productoras de panela reportada por Espitia et al. (2020). El objetivo del uso de este método fue determinar el volumen y el área de la parrilla en función de la cantidad de panela por producir. Luego, se ajustó el diseño para mantener el volumen de una cámara Ward-Cimpa disminuyendo la altura y empleando secciones curvas (superficies radiantes) para aumentar el factor de visión sobre la flama. Posteriormente, se simuló el prototipo con herramientas de CFD. Finalmente, se construyó la cámara de combustión para una escala de producción de 90 kg de panela/h con los parámetros y materiales de diseño detallados, y, por último, se validó.

Diseño de la cámara de combustión

El requerimiento térmico del proceso para el dimensionamiento de la cámara de combustión se basó en el modelo 0D propuesto por Espitia et al. (2020) y en los balances de energía y materia. Con esta información, se procedió a determinar el volumen y las dimensiones de la parrilla, la rampa de secado, la garganta, las entradas auxiliares de aire y la entrada inferior para el limpiado de la parrilla, considerando las recomendaciones descritas en el manual de hornillas paneleras de Gordillo Ariza y García Bernal

(1992). Por último, después de determinar el volumen de la cámara de combustión y sus dimensiones generales, se determinaron las pérdidas por las paredes de la cámara.

Simulación de la cámara de combustión

Dominio computacional

La simulación se hizo sobre la geometría de la cámara de combustión resultante del ajuste del diseño de una cámara Ward-Cimpa (figura 8.1). El dominio utilizado en este caso está formado por los gases de combustión, los cuales son transportados por la cámara por efecto del tiro generado en la chimenea. El modelo de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorado se presenta en la figura 8.1.

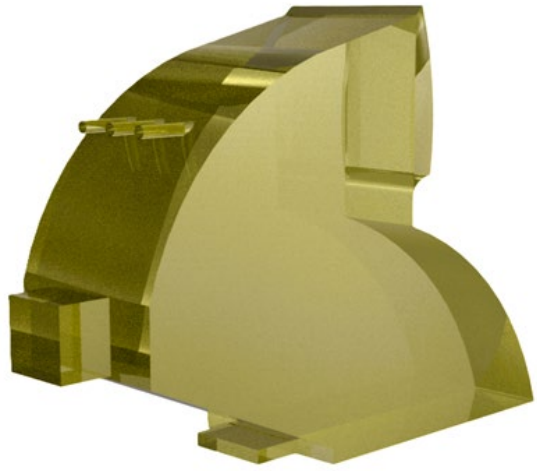


Figura 8.1. Diseño del modelo de cámara de combustión Ward-Cimpa mejorado.

Fuente: Elaboración propia

Para la ecuación de transporte, el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante y el modelo de radiación (armónicos esféricos, aproximación P1 y suma ponderada de gases grises), se consideraron los modelos y ecuaciones reportados por La Madrid et al. (2016).

Preprocesamiento y configuración del solucionador

Se utilizó el *software* Ansys CFX para obtener una solución numérica en estado estacionario (Espitia et al., 2020). Esta herramienta computacional utiliza un enfoque híbrido único de elementos/volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes (Ansys, 2013). La tabla 8.1 muestra los datos de entrada para la simulación, incluyendo el bagazo, el aire y las propiedades del gas cuando la cámara alcanza el equilibrio térmico (Espitia et al., 2020).

Tabla 8.1. Datos de entrada para la simulación de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada

Corriente	Variable	Valor
Bagazo	Flujo (kg/h)	237,6
	Humedad (%)	40
Aire	Exceso de aire (%)	80
Gases de combustión	CO_2 producido (kg)	272,11
	CO producido (kg)	9,12
	H_2O total (kg)	169,60
	O_2 producido (kg)	181,91
	N_2 producido (kg)	1.308,74
	Gas total (kg/h)	1.941,47
	Velocidad inicial (m/s)	7,89
	Temperatura de flama (°C)	1.160,36
	Energía inicial de gas (kW)	748,73

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del equipo construido

La cámara de combustión se construyó considerando los detalles de diseño de la figura 8.2 (superficies radiantes). Se utilizó ladrillo

refractario para disminuir las pérdidas de calor y una parrilla en fundición para resistir las temperaturas alcanzadas en el proceso. Además, se calcularon las pérdidas de potencia por los distintos mecanismos de transferencia de calor (radiación y convección) que suceden en la cámara.

El bagazo suministrado a la cámara de combustión se pesó con una balanza electrónica KERN HCB 200K500. El consumo de combustible se midió por triplicado con muestras aproximadas de 100 kg de bagazo, con un contenido de humedad del 40 % (b. h.). El contenido de humedad inicial del bagazo se determinó de acuerdo con las normas de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000). Para la medición de la temperatura, se instalaron termopares tipo K sobre la cámara de combustión, la cual se conectó a un sistema de adquisición de datos Intech Micro 2100-A16 programado para registrar mediciones cada 60 s durante cada lote de producción. La composición de los gases de combustión (CO_2, CO y O_2) se midió en la chimenea a una altura de 4 m desde la base, con un analizador Testo 350 S/XL. Las mediciones se realizaron durante 30 min con un intervalo de tiempo de 15 s.

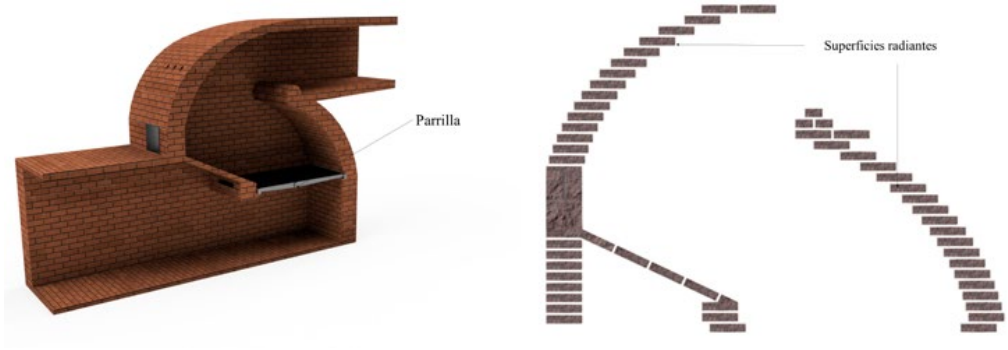


Figura 8.2. Diseño propuesto para la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada.

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Diseño de la cámara de combustión

A la cámara de combustión Ward-Cimpa ajustada se le modificaron las dos superficies radiantes (figura 8.2): se dispuso una superficie curva sobre el plano ortogonal a la parrilla, a fin de obtener una mayor superficie radiante sobre la parrilla, y otra superficie curva sobre el plano tangente a la entrada de bagazo, con el fin de obtener una superficie radiante mayor sobre la rampa de secado. Por otro lado, se logró mantener el volumen requerido para la generación de la potencia térmica requerida por el proceso sin necesidad de aumentar el volumen de la cámara, como sucede en el diseño original. Además, se redujo la altura del cenicero sin comprometer la ergonomía del personal encargado de la limpieza. Los ladrillos refractarios permitieron, por sus características, mantener el calor al que son expuestos y evitar su disipación a los alrededores, lo que redujo la pérdida de calor que normalmente ocurre en el proceso.

Simulación de la cámara de combustión

Para evaluar los cálculos teóricos de la cámara de combustión, se utilizó el *software* CAE Ansys, con en el módulo de fluidos CFX. Los resultados de la simulación permitieron determinar el cambio de temperatura y el movimiento de los gases dentro de la cámara de combustión, como se muestra en la figura 8.3.

Se observa que los gases de combustión mantienen su temperatura en su paso por la cámara (figura 8.3a) debido a la forma y al material refractario utilizado. Además, se produce suficiente energía para calentar la rampa de entrada de bagazo, a través del mecanismo de radiación. Las superficies radiantes de la cámara de combustión (inferior y superior) permitieron una distribución y un flujo de los gases de combustión adecuados (figura 8.3b), lo que evita que haya zonas muertas o estancadas, por lo que el diseño propuesto cumplió con lo esperado.

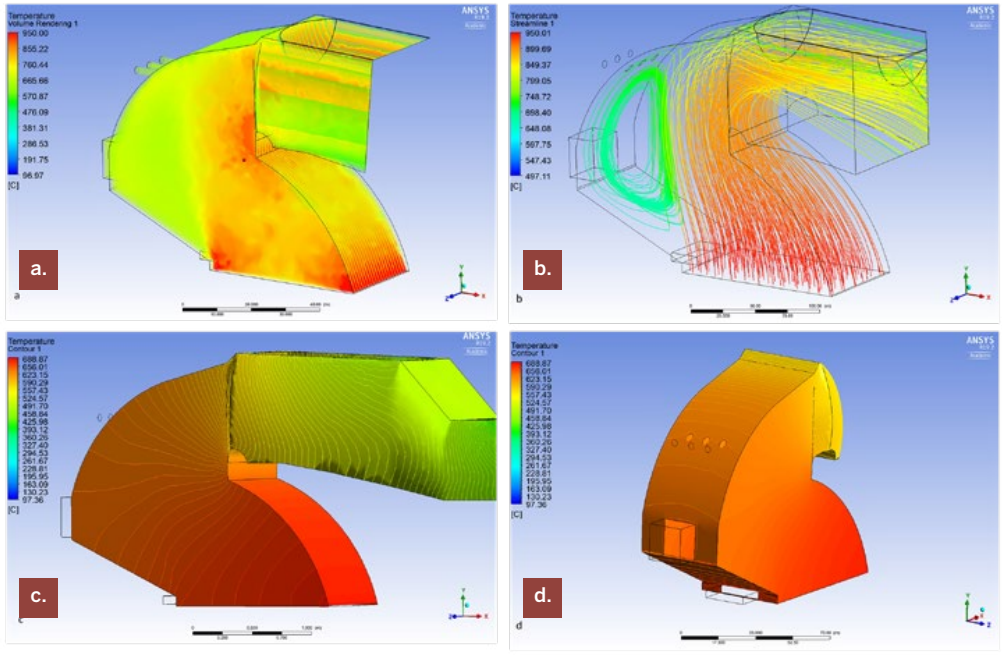


Figura 8.3. Temperatura y movimiento de los gases en la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada, con superficies radiantes en los arcos inferior y superior.

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 8.3c y 8.3d se observan las superficies radiantes de los arcos inferior y superior; gracias a ellas es posible mantener una temperatura elevada dentro de la cámara de combustión, en la cual predomina el mecanismo de transferencia de calor por radiación dentro del volumen control.

Evaluación de la cámara de combustión

Los resultados de la simulación fueron validados con datos en campo, para lo cual se construyó la cámara de combustión acorde con los diseños propuestos en la Unidad Productiva de Famiempresas de San Isidro, ubicada en Ricaurte, Nariño. El consumo promedio del bagazo suministrado a la cámara de combustión fue de 213,02 kg/h, que fue cercano al valor calculado (237 kg de bagazo/h). La temperatura promedio de la cámara fue de 1.025 °C,

con un máximo de 1.160 °C después de 3 h de operación de la hornilla. Estos valores de temperatura son adecuados para el tipo de combustible utilizado, lo que permite asegurar una eficiencia de combustión superior al 99 %.

Las emisiones producidas por la cámara de combustión fueron evaluadas en la chimenea (tabla 8.2). Los valores altos de CO_2 y bajos de CO permiten establecer un proceso de combustión adecuado, teniendo en cuenta que el gas de mayor interés para una combustión completa es el CO_2, debido a que es el que mayor energía libera durante su formación en comparación con los demás gases generados en la combustión del bagazo. Asimismo, con respecto al porcentaje de aire en exceso en el proceso, este se mantuvo alrededor del 60 %; para sistemas de combustión de biomasa en lecho fijo, como es el caso del bagazo en la hornilla, es un valor adecuado según lo reportado por Rodríguez et al. (2018). Adicionalmente, el valor del 60 % de exceso indica que el tamaño de la parrilla calculado para la entrada de aire primario es el adecuado para lograr un proceso de combustión eficiente.

Tabla 8.2. Parámetros de la combustión del bagazo en lecho fijo con la cámara Ward-Cimpa mejorada

Parámetro	Valor
CO_2 (kg/h)	305,13 ± 10,91
CO (kg/h)	2,84 ± 1,6
Temperatura en la cámara (°C)	1.015 ± 59,46
Exceso de aire (estequiométrico = 1)	1,63 ± 0,52

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la evaluación permitieron corroborar los resultados de la simulación, para los cuales se obtuvo una eficiencia de combustión del 99 %. La diferencia entre el valor de temperatura calculado (950 °C) y el obtenido en la evaluación

(1.015 °C) permite confirmar una buena bondad de ajuste entre dichos valores calculados y los medidos en campo. Además, el consumo de bagazo se mantuvo en el rango esperado del diseño para producir 90 kg de panela/h, por lo que el prototipo podría ser de interés para nuevos módulos de producción de panela de pequeños y medianos productores que requieran optimizar la generación y el uso de la energía. Los resultados de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada permiten tener procesos autosuficientes, en los que solo se usa el bagazo obtenido del proceso de molienda. Su alta eficiencia de combustión (99 %) permite disponer del flujo de calor necesario para suplir las demandas energéticas en la evaporación del jugo de caña para la producción de panela, lo que maximiza el aprovechamiento del poder calorífico del bagazo para la generación de energía térmica.

Conclusiones

El diseño de una cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada logró reducir la altura de la cámara y mantener su relación de volumen para suplir la demanda energética a una escala de producción de 90 kg de panela/h, por lo cual podría ser una alternativa técnicamente viable para los sistemas tradicionales de producción de panela de pequeña escala. Adicionalmente, al ser una cámara que opera con bagazo con un contenido de humedad de ≤40 % (b. h.), disminuye la dependencia del bagazo seco (≤30 % b. h.) que tienen los productores para poder operar en las cámaras tradicionales. Lo anterior permite reducir el área de infraestructura del trapiche, al requerir un menor espacio para el almacenamiento y secado natural del bagazo.

La simulación del proceso de combustión usando CFD se presenta como una herramienta útil para el diseño y dimensionamiento de las cámaras de combustión con una buena correlación entre los datos calculados y los medidos en campo.

Agradecimientos

Agradecemos a la Gobernación de Nariño y al Sistema General de Regalías por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en el convenio 1976 de 2016, y a los demás integrantes del proyecto "Mejoramiento de la eficiencia del proceso de combustión de bagazo y de transferencia de calor en los trapiches paneleros, mediante la implementación de quemadores de biomasa y sistemas pirotubulares de transferencia de calor".

Referencias

Ansys. (2013). *Ansys fluent theory guide*.

Anwar, S. I. (2010). Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans. *Energy Conversion and Management*, *51*(2), 360-364. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.033

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis* (17.ª ed.).

Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, *274*, artículo 109843. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843

Gómez, M. A., Porteiro, J., Patiño, D., & Míguez, J. L. (2015). Eulerian CFD modelling for biomass combustion. Transient simulation of an underfeed pellet boiler. *Energy Conversion and Management*, *101*, 666-680. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.003

Gordillo Ariza, G., & García Bernal, H. R. (1992). *Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Karim, M. R., & Naser, J. (2017). Numerical modelling of solid biomass combustion: Difficulties in initiating the fixed bed combustion. *Energy Procedia*, *110*, 390-395. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.158

La Madrid, R., Marcelo, D., Mendoza Orbegoso, E., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery

production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, *125*, 107-120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

Sánchez Castro, Z., & Mendieta Menjura, O. A. (2014). Ajuste de un modelo matemático para la combustión de bagazo de caña en una cámara Ward-Cimpa. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *15*(2), 133-151. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945182001

Velásquez, F., Espitia, J., Hernandez, H., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2021). Improving the thermal, productive, and environmental performance of a non-centrifugal cane sugar production module using a heat recovery system. *Journal of Food Engineering*, *308*, artículo 110688. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110688

Wang, Y., & Yan, L. (2008). CFD studies on biomass thermochemical conversion. *International Journal of Molecular Sciences*, *9*(6), 1.108-1.130. https://doi.org/10.3390%2Fijms9061108



Capítulo 9

Diseño de un intercambiador de calor semicilíndrico con aletas para la producción de azúcar no centrifugada de caña

Fabián Andrés Velásquez Ayala, John Javier Espitia González, Oscar Andrés Mendieta Menjura y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

En el proceso de producción de azúcar no centrifugada de caña (ANC), la energía térmica requerida se obtiene de la combustión del bagazo, la cual se transfiere hacia los intercambiadores de calor abiertos (pailas) a lo largo del ducto de gases. Según el mecanismo de transferencia de calor predominante en las diferentes secciones del ducto, se utilizan diferentes tamaños y formas geométricas de las pailas. El objetivo de este trabajo fue mejorar el aprovechamiento del flujo de calor de los gases de combustión mediante el diseño y construcción de un tipo de paila acorde con el mecanismo de transferencia de calor predominante. Se realizó la simulación del intercambiador de calor por dinámica de fluidos computacional (CFD) y luego se validó. El intercambiador de calor propuesto permitió aumentar el aprovechamiento del flujo de calor de 22,34 a 36,31 kW/m^2, en comparación con otro intercambiador de calor usado tradicionalmente en la misma parte del ducto.

Palabras clave: proceso de evaporación, transferencia de calor por radiación, transferencia de calor por convección, potencia térmica, dinámica de fluidos computacional

Nomenclatura

ANC: azúcar no centrifugada de caña

k: energía cinética de turbulenta (m^2/s^2)

S_{ij}: tasa media del tensor de deformación (Pa)

$\tilde{U}$: vector de velocidad (m/s)

x_i: vector de posición

μ: viscosidad molecular (Pa/s)

μ_t: viscosidad turbulenta (Pa/s)

ρ: densidad (kg/m^3)

σ_k: constante del modelo de turbulencia SST k-ω

$\sigma_{\omega,1}, \sigma_{\omega,2}$: constante del modelo de turbulencia SST k-ω

ω: frecuencia turbulenta (1/s)

Introducción

El proceso de elaboración de panela se realiza generalmente en una hornilla, la cual emplea bagazo de caña de azúcar para generar la energía requerida en las etapas térmicas del proceso (precalentamiento, clarificación, evaporación y concentración). En los sistemas tradicionales de producción de ANC, se estima que del 100 % de la energía generada solo se aprovecha un 30 %; la energía restante se pierde por las paredes del ducto y con los gases de combustión que salen por la chimenea. Este valor (30 %) indica que no se hace un uso eficiente de la energía generada en el proceso de combustión del bagazo (Sardeshpande et al., 2010),

situación que hace que el proceso no sea autosuficiente energéticamente, siendo necesario suplir el requerimiento energético con otros tipos de combustibles (leña, carbón, caucho de llanta, entre otros). Esta práctica hace que se incrementen los costos del proceso de elaboración de panela y provoca un impacto en el medio ambiente por la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero (CO, CO_2, NO_X y SO_X) (Amosun et al., 2000).

La etapa de evaporación del agua de los jugos de la caña de azúcar es la de mayor consumo energético del proceso de elaboración de panela, ya que en esta se remueve más del 80 % del agua presente en el jugo. La evaporación se realiza tradicionalmente en intercambiadores de calor abiertos (pailas) de diferentes configuraciones geométricas, construidos en acero inoxidable. Las configuraciones geométricas de las pailas varían según la etapa térmica del proceso. Las pailas pirotubulares, planas o acanaladas, con o sin aletas, se utilizan principalmente para las etapas de clarificación y evaporación, mientras que las pailas semicilíndricas o semiesféricas son adecuadas para la concentración, así como para la etapa de evaporación (La Madrid et al., 2016; Velásquez et al., 2021).

El mecanismo de ebullición que se realiza en la producción de ANC es conocido como "piscina" o "alberca" (convección natural) (Rodríguez et al., 2018). La evaporación realizada de esta forma incrementa el consumo de energía, debido a que se debe vencer la presión atmosférica y la ejercida por la columna de líquido dentro de la paila para lograr la ebullición del jugo. Adicionalmente, dada la baja relación de área de transferencia de calor por unidad de volumen, las hornillas paneleras presentan gran tamaño, costos elevados y altas pérdidas de energía.

La eficiencia térmica global de una hornilla depende, por un lado, de la capacidad del sistema de combustión para generar la energía térmica y, por otro lado, de los intercambiadores de calor para aprovechar la energía térmica de los gases de combustión para evaporar el agua presente en el jugo de caña.

La energía requerida para el proceso se obtiene de la transformación termoquímica del bagazo. El bagazo que resulta de la molienda de la caña de azúcar tiene el potencial energético suficiente para suplir la energía térmica del proceso. Sin embargo, diferentes estudios reportan que del calor generado en la combustión se pierde el 71,4 %, del cual el 80 % se pierde con los gases de chimenea, el 19,7 % con los inquemados y pérdidas por paredes, y el 0,3 % con las cenizas (Anwar, 2010).

Las herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) han permitido definir perfiles de temperatura y mecanismos de transferencia de calor a lo largo del ducto de gases de combustión. En este aspecto, La Madrid et al. (2016) establecieron la tasa de transferencia de calor de los gases de combustión al jugo de caña considerando dos casos: 1) paredes adiabáticas sin incluir fenómenos de radiación térmica, y 2) perfil de temperatura lineal a lo largo de las paredes del ducto de combustión, incluida la radiación térmica del modelo P-1. Los resultados obtenidos por La Madrid et al. (2016) permitieron establecer el mecanismo predominante de transferencia de calor a lo largo del ducto de gases de combustión, así como validar la herramienta de CFD para el diseño de las unidades de producción. Con base en el estudio realizado por La Madrid et al. (2016), es posible modificar y distribuir los intercambiadores de calor a lo largo del ducto para aprovechar eficientemente el calor proveniente de los gases de combustión, aumentar la eficiencia térmica del proceso y garantizar la calidad fisicoquímica y organoléptica del jugo. Sobre este último aspecto, los largos tiempos de retención del jugo en el proceso de evaporación conducen a una serie de cambios en la composición, como inversión de sacarosa, cambios de calor y degradación de compuestos nutritivos (Jaffé, 2015). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo de investigación fue mejorar el aprovechamiento de los flujos de calor generados en el proceso de combustión del bagazo mediante el diseño e implementación de un intercambiador de calor semicilíndrico aleteado, usando la herramienta de CFD para predecir su desempeño energético.

Metodología

Configuración del módulo de producción

Para la experimentación, se consideró la planta piloto de producción de ANC ubicada en la sede Cimpa de AGROSAVIA (5° 56' 52,1" N y 73° 36' 24,5" W). En la figura 9.1 se describe el módulo de producción de ANC con sus respectivos intercambiadores de calor (1-5). Los intercambiadores 1 y 3 son utilizados en la etapa térmica de evaporación, mientras que los intercambiadores 2 y 4 son utilizados para la concentración y clarificación, respectivamente. El intercambiador 5 se utiliza para obtener el subproducto cachaza como resultado del proceso de clarificación y limpieza de los jugos. El subdominio de estudio seleccionado fue el intercambiador 3, del que se realizaron simulaciones computacionales para evaluar la implementación de dos tipos de intercambiadores de calor abiertos: semicilíndrico (figura 9.1a) y semicilíndrico con aletas (figura 9.1b). Posteriormente, la paila con mejor desempeño fue construida y evaluada experimentalmente.

Formulación matemática

Los fenómenos térmicos y dinámicos se simularon en estado estacionario (Espitia et al., 2020) utilizando un conjunto de formulaciones matemáticas que incluyen ecuaciones de transporte de masa, momento y energía, acopladas a modelos que describen turbulencia y radiación térmica entre los gases de combustión y el intercambiador de calor abierto.

Se utilizaron las ecuaciones de Navier-Stokes (la *Reynolds-averaged Navier-Strokes* [RANS]) en estado estacionario definido para un marco euleriano, considerando el gas de combustión como un fluido comprimible (Versteeg & Malalasekera, 2007). Para la ecuación de transporte de energía, se considera que los términos de difusión térmica-molecular, el flujo turbulento convectivo de energía interna y el término fuente de radiación térmica tienen valores numéricos más altos en comparación con el término asociado a la disipación viscosa, por lo que este último no se tuvo en cuenta (Espitia

et al., 2020). De manera similar, el flujo de gases de combustión se considera subsónico, por lo que la energía asociada a las variaciones temporales de presión es despreciable (La Madrid et al., 2016).

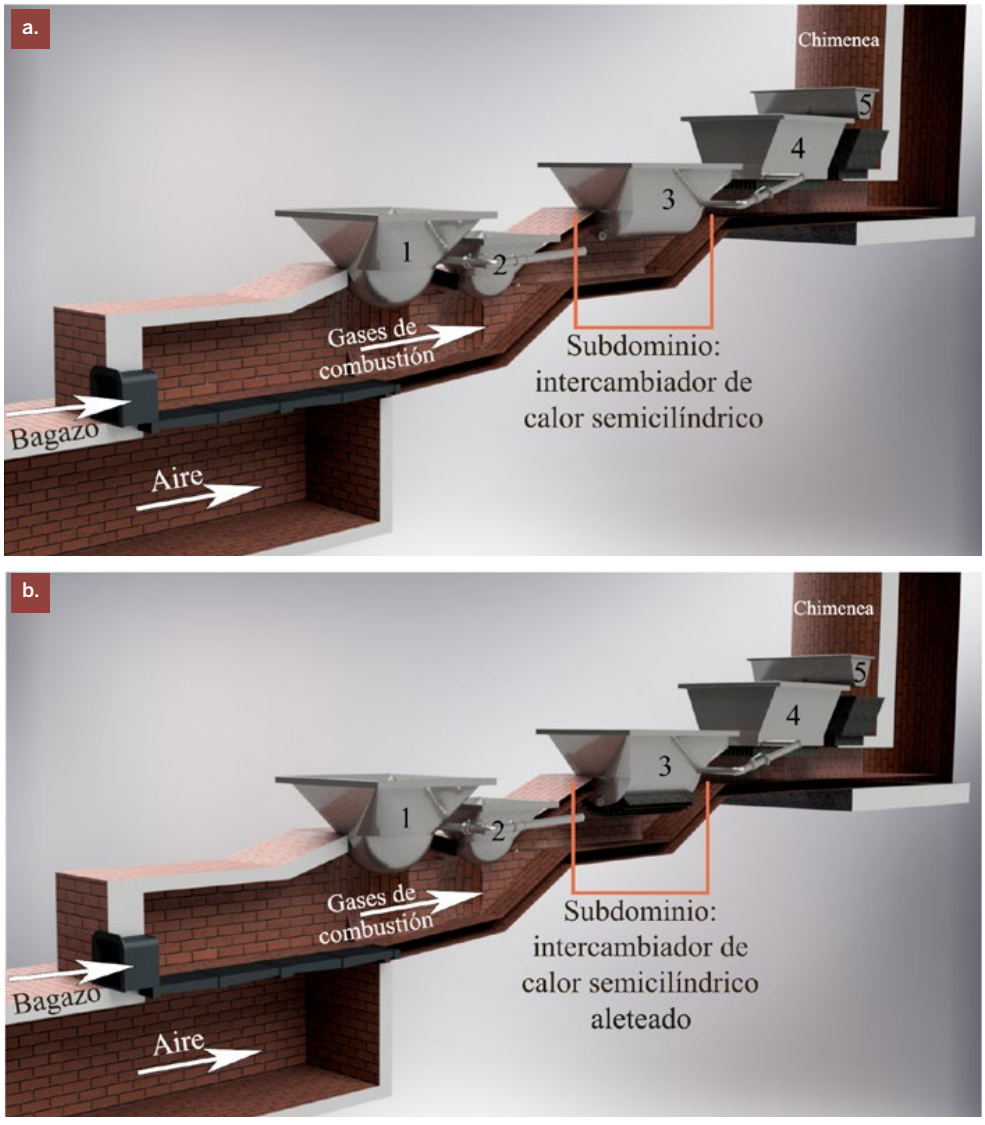


Figura 9.1. Módulo de producción de panela. a. Propuesta inicial con intercambiador de calor semicilíndrico (3); b. Propuesta con intercambiador de calor semicilíndrico aleteado (3).

Fuente: Elaboración propia

El modelo de turbulencia SST k-ω transforma la ecuación de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ω usando la expresión de la frecuencia turbulenta ε=kω en las regiones cercanas a la pared, mientras que usa el modelo estándar de k-ε en regiones turbulentas lejanas a la pared (Menter, 1993). Para este modelo, se desarrollaron las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta *k* (ecuación 1) y la frecuencia turbulenta ω (ecuación 2) descritas por Espitia et al. (2020).

$$\nabla \cdot (\rho \omega \tilde{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] = 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho k \omega \quad \text{(ecuación 1)}$$

$$\nabla \cdot (\rho \omega \tilde{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \nabla \omega \right] = \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad \text{(ecuación 2)}$$

Asimismo, para la transferencia de calor para líquidos en ebullición, se utilizó el modelo propuesto por Rohsenow (1951). Este modelo relaciona el flujo de calor con la temperatura de la pared de la superficie de calentamiento en función de las propiedades físicas y termodinámicas del líquido en ebullición a la concentración definida de sólidos solubles totales. Además, es útil por su fácil implementación tanto en modelos de CFD como en el diseño de sistemas de producción de ANC con ecuaciones simplificadas de origen teórico y empírico. Se consideró el modelo de radiación P-1 para determinar la transferencia de calor por radiación a partir de la intensidad de radiación (I) (Modest & Mazumder, 2021).

Finalmente, se utilizó el método de suma ponderada de gases grises, en el cual se asume que el coeficiente de absorción es constante para todo el medio gaseoso y el gas es reemplazado por una serie de gases grises, por lo que la transferencia de calor se calcula de forma independiente para cada gas (Hottel & Sarofim, 1970). La emisividad ϵ y los coeficientes de absorción α se calcularon según lo reportado por Espitia et al. (2020).

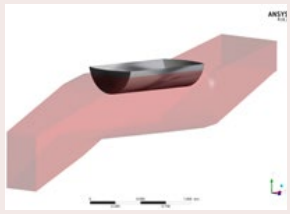
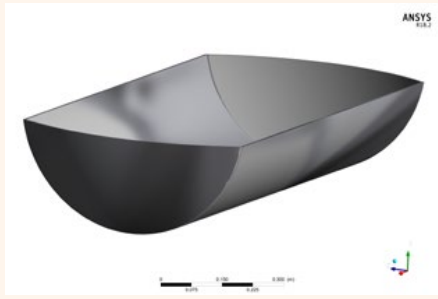
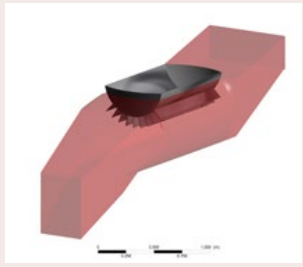
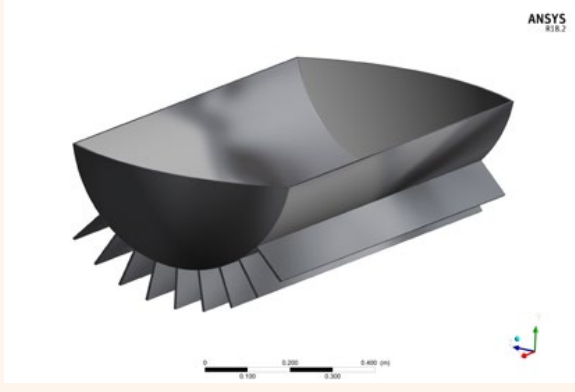
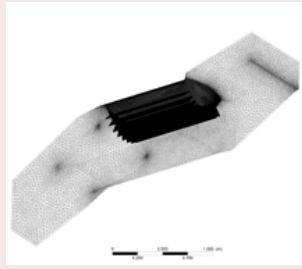
Dominio computacional

El dominio para los dos casos simulados está conformado, a su vez, por dos subdominios:

- Gases de combustión: subdominio de tipo fluido (de color rojo en la tabla 9.1). Los gases se forman en el proceso de combustión del bagazo de caña y luego se desplazan a través del ducto por efecto del tiro generado en la chimenea. Durante este desplazamiento, los gases suministran la energía térmica a los intercambiadores de calor abiertos para realizar el proceso de evaporación del jugo.
- Intercambiador de calor abierto: subdominio de tipo sólido (de color gris en la tabla 9.1). Corresponde al intercambiador de calor, el cual es de acero inoxidable y consta de una configuración semicilíndrica sin aletas (PS) y una semicilíndrica con aletas (PSA) para los casos 1 y 2, respectivamente.

Posteriormente, para la discretización de cada subdominio se elaboró una malla computacional con la *Ansys Meshing tool* (Ansys, 2013). Para obtener una mejor predicción de los fenómenos de capa, se realizaron refinamientos de malla (tabla 9.1) en las capas límite entre el gas de combustión y el intercambiador de calor abierto. Para la obtención de la solución numérica en estado estacionario, se utilizó el *software* Ansys CFX (Ansys, 2013). Las tablas 9.2 y 9.3 muestran las condiciones de frontera y las propiedades termodinámicas y de transporte para cada subdominio computacional, respectivamente.

Tabla 9.1. Geometría, dominios computacionales y calidad de malla

Caso	Configuración geométrica	Malla	Calidad de malla
PS	 		Nodos: 322.596 Elementos: 1.523.458 Calidad ortogonal: 0,7478 *Aspect ratio:* 1,9081
PSA	 		Nodos: 7.484.945 Elementos: 39.947.735 Calidad ortogonal: 0,7786 *Aspect ratio:* 1,8322

Nota: Caso 1: paila semicilíndrica sin aletas (PS); caso 2: paila semicilíndrica con aletas (PSA)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9.2. Condiciones de frontera por subdominio computacional

Subdominio	Región	Condición de frontera
Gases de combustión	Entrada	$Y_{CO_2} = 0{,}1378,\ Y_{CO} = 9e\text{-}4,\ Y_{O_2} = 0{,}1055,$ $Y_{N_2} = 0{,}6974,\ Y_{H_2O} = 0{,}0584$
		Presión absoluta: 0,87 atm
		Temperatura: 833,31 °C
		Intensidad turbulenta: 0,05
		Caudal másico: 0,5199 kg/s
	Salida	Caudal másico: 0,5199 kg/s
	Pared del ducto	Pérdidas: 4 W/m^{2}K
Intercambiador de calor abierto (paila)	Material	Acero
	Pared	Temperatura: 98 °C
		Emisividad: 0,4

Fuente: Elaboración propia

Evaluación experimental

Las mediciones experimentales se realizaron para tres lotes de producción con tres réplicas cuando la hornilla alcanzó el equilibrio térmico (aproximadamente tres horas).

Las variables determinadas fueron la siguientes:

Temperatura y contenido de sólidos solubles totales en los jugos de caña

La temperatura de los jugos en cada intercambiador se midió utilizando un termómetro digital marca Testo 735 y una termocupla tipo K para fase líquida. La determinación de la concentración de sólidos solubles (CSS) en jugos y mieles se hizo con refractómetros digitales Atago modelos PAL-1 y PAL-2 de 0 a 53 °Bx y de 45 a 93 °Bx, respectivamente. Las mediciones de temperatura y CSS

se realizaron al inicio y al final de cada etapa térmica. Por otra parte, se tomaron muestras de azúcar no centrifugada producida para determinar la CSS utilizando la técnica de dilución 1:4. La velocidad de calentamiento se obtuvo midiendo la temperatura y el tiempo simultáneamente.

Tabla 9.3. Propiedades termodinámicas y de transporte en los subdominios

Subdominio	Propiedad	Valor
Gases de combustión	Fase termodinámica	Gas
	Material	Mezcla de composición fija
	Temperatura de referencia	25 °C
	Presión de referencia	1 atm
	Propiedad de mezcla	Mezcla ideal
	Densidad	Gas ideal
	Capacidad calorífica	Mezcla ideal
	Viscosidad dinámica	Mezcla ideal
	Conductividad térmica	Mezcla ideal
	Emisividad de pared	0,96
Intercambiador de calor abierto (paila)	Fase termodinámica	Sólida
	Material	Acero
	Densidad	7.854 kg/m^3
	Capacidad calorífica	500 J/kgK
	Conductividad térmica	21,5 W/mK
	Emisividad de pared	0,4

Fuente: Elaboración propia

Capacidad de producción

Para determinar la capacidad de producción, se midió la masa de azúcar no centrifugada fría producida por hora durante la jornada

de producción. La primera medición fue descartada, por lo que se empezaron a tomar medidas a partir del segundo lote. Para la medición de la masa de panela producida se utilizó una balanza marca Lexus Fenix con una capacidad de 30 kg.

Caudal másico y contenido de humedad en el combustible

El combustible utilizado fue bagazo de caña, el cual se consideró como seco cuando el contenido de humedad oscilaba entre el 20 y el 35 % b. h., y como húmedo cuando la humedad era mayor al 36 % b. h. El peso del combustible se midió utilizando una báscula electrónica de plataforma marca Ohaus T21P, con una capacidad de 5-20.000 kg. Una vez se inició la toma de medidas, es decir, cuando se produjo el punto del lote de panela inmediatamente anterior, se procedió a pesar la cantidad de combustible suministrado y a medir el tiempo de consumo hasta la finalización del lote de producción.

Para la determinación del contenido de humedad del bagazo, se tomaron tres muestras de 100 g de combustible y se sometieron a secado durante 24 h a 105 °C en un horno convectivo con control de temperatura. El contenido de humedad se calculó de acuerdo con la ecuación 3.

$$H = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad \text{(ecuación 3)}$$

Temperatura de los gases de combustión

Para obtener el perfil de temperatura de los gases de combustión en la hornilla, se utilizaron termocuplas tipo K (marca Instrumatic), para lecturas de hasta 1.200 °C, conectadas a un registrador de datos, el cual grababa la información cada 5 s. Se instalaron termocuplas en la cámara de combustión, entre cada intercambiador de calor abierto a lo largo del ducto de gases y en la chimenea.

Composición de los gases de combustión

Para determinar la concentración porcentual de CO_2, CO y O_2 en los gases de combustión, se utilizó un analizador de gases marca Testo 350 XL. La evaluación de las emisiones se realizó por medición directa en la chimenea por triplicado. El equipo se programó para tomar datos en un lapso de 15 min con intervalos de medición cada 15 s.

Resultados

Inicialmente, se realizaron las simulaciones con CFD de los dos casos: paila semicilíndrica (PS) y paila semicilíndrica con aletas (PSA), tomando como referencia una temperatura de entrada de los gases de combustión a la entrada del dominio de 833,31 °C, la cual se comparó posteriormente con los resultados experimentales. A continuación, se reportan los resultados para el perfil de temperatura y flujo de calor.

Perfil de temperatura simulada por CFD

Como se muestra en la tabla 9.4, la PSA muestra un valor más bajo de temperatura a la salida del dominio (744,60 °C) que la PS (758,70 °C). Por otra parte, la figura 9.2 muestra la evolución del perfil de temperatura de los gases de combustión en el ducto de gases para ambos casos; se observa un agotamiento térmico más pronunciado de los gases de combustión en la PSA (figura 9.2c). En la figura 9.3 se describen los datos de temperatura promedio de cada plano mostrado en las figuras 9.2b y 9.2d, en los casos PS y PSA, respectivamente; el valor 0 en el eje de las coordenadas indica la localización del plano de corte, situado en el centro del subdominio de los gases de combustión. En general, la figura 9.3 muestra una disminución más significativa de la temperatura de los gases de combustión en cada plano para el caso de la PSA, lo que indica un mayor aprovechamiento energético por parte de esta configuración geométrica.

Tabla 9.4. Temperatura experimental y simulada

Caso	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Error* (%)
PS simulada	833,31	758,7	
PSA simulada	833,31	744,6	0,45
PSA experimental	833,31 ± 59,52	741,26 ± 51,47	

* Error con respecto a la temperatura de salida

Fuente: Elaboración propia

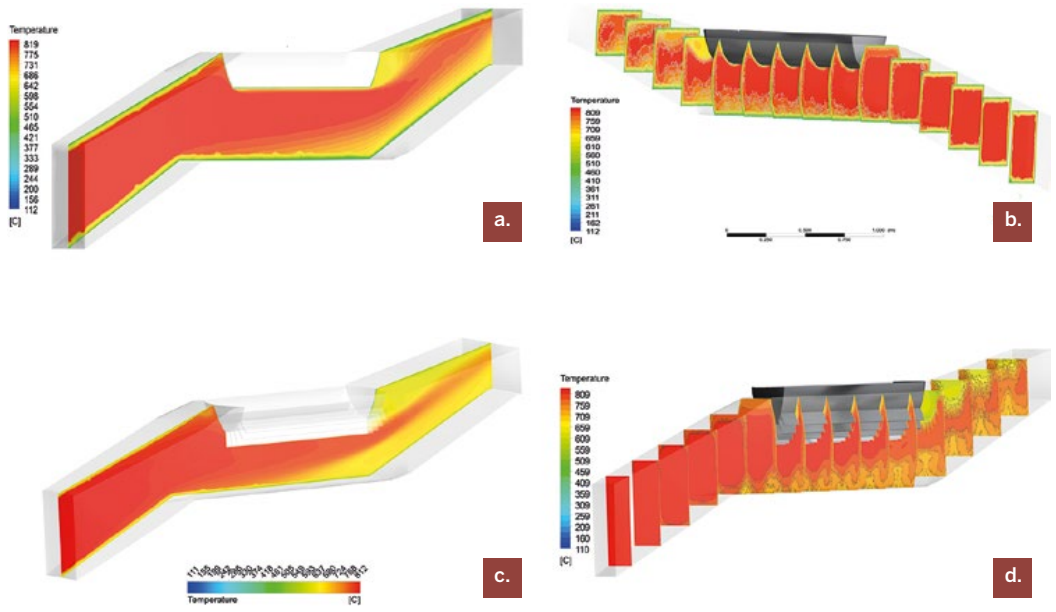


Figura 9.2. Perfil de temperatura en el subdominio de gases de combustión. a y b. PS; c y d. PSA.

Fuente: Elaboración propia

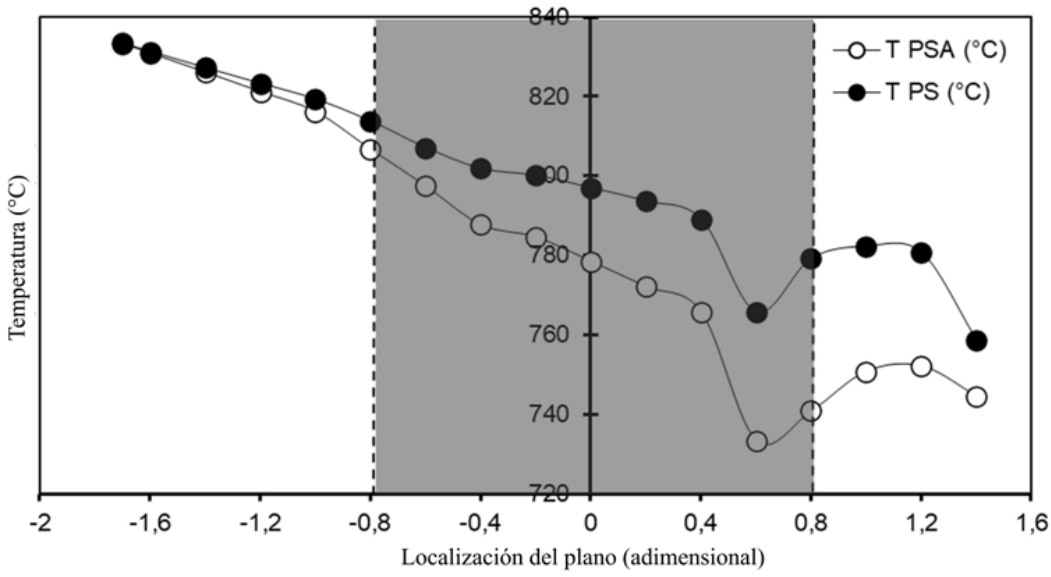


Figura 9.3. Perfil de temperatura promedio por plano transversal en PSA y PS.

Fuente: Elaboración propia

Calor transferido

La tabla 9.5 muestra la potencia térmica por cada frontera establecida y el flujo de calor en cada caso simulado. La PSA transfirió un 25,85 % más de potencia térmica que la PS. Por otra parte, la figura 9.4 muestra los contornos de flujo de calor para ambos casos. Se puede observar que se presenta una mejor distribución del flujo de calor en la PSA (figura 9.4b), donde se presentan valores máximos de 60 kW/m^2, a diferencia de la PS (figura 9.4a), donde los valores máximos están en el orden de 30 kW/m^2. El valor promedio de flujo de calor para los casos PSA y PS fue de 36,31 y 22,34 kW/m^2, respectivamente.

Tabla 9.5. Potencia térmica y flujo de calor

Frontera	Potencia térmica (kW)			Error* (%)
	PS	PSA	Experimental	
Entrada	484,67	484,67	452,28 ± 43,58	7,16
Potencia térmica transferida	10,90	14,70	13,73 ± 2,74	7,08
Pérdida de calor por las paredes	23,57	38,34	43,46 ± 8,68	11,79
Salida	450,21	431,66	395,09 ± 38,07	9,28
Flujo de calor (kW/m^2)	22,34	36,31	41,39	12,28

* Error con respecto a la PSA

Fuente: Elaboración propia

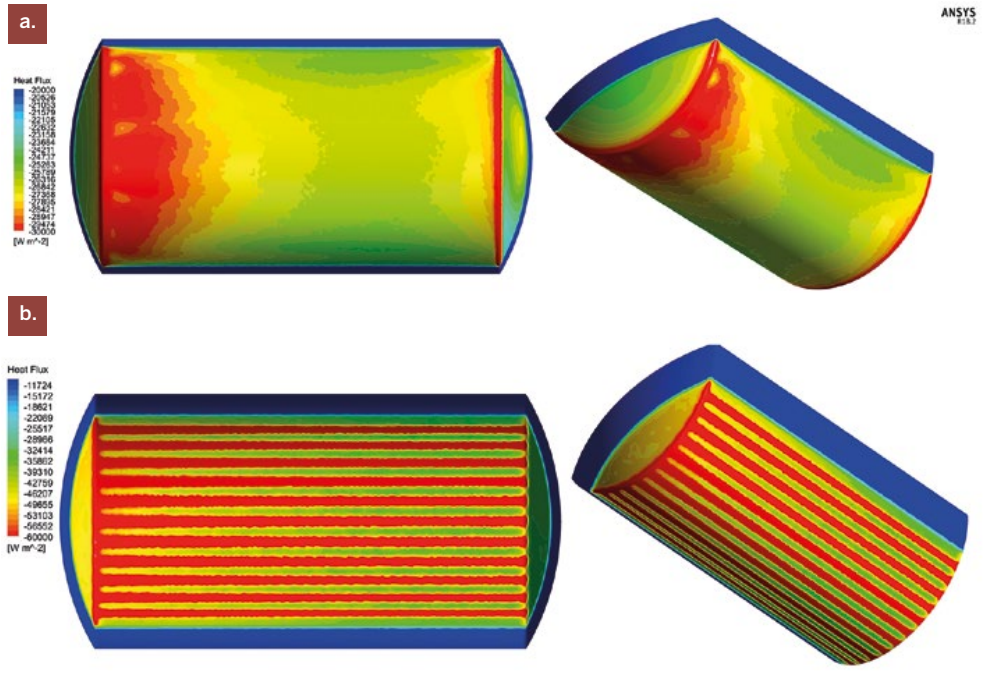


Figura 9.4. Contornos de flujo de calor. a. PS; b. PSA.

Fuente: Elaboración propia

Construcción y validación experimental

De acuerdo con los resultados obtenidos entre las comparaciones de PSA y PS, la configuración geométrica PSA fue construida y evaluada experimentalmente. La PSA está compuesta por medio cilindro de lámina de acero inoxidable, dos cascos de aproximadamente ¼ de esfera, una pirámide truncada para almacenamiento de jugo (comúnmente denominada "falca") y aletas en la parte de contacto con los gases de combustión (tabla 9.1). La PSA se caracteriza por tener una mayor área de transferencia de calor, a diferencia de las pailas planas, y su geometría permite reducir el ancho del ducto de la hornilla (figura 9.5).

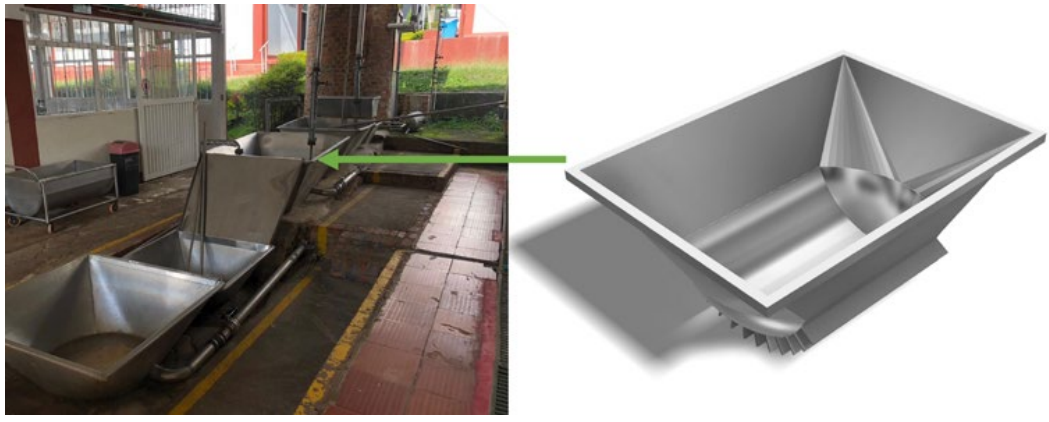


Figura 9.5. Modelo de hornilla construido que incluye la PSA.

Fuente: Oscar Andrés Mendieta Menjura

Se obtuvo un buen ajuste entre el modelo y los datos experimentales en el perfil de temperatura y el flujo de calor. Entre los datos simulados de la PSA y los datos experimentales, las tablas 9.1 y 9.5 muestran un error absoluto de 0,45, 7,08 y 12,28 % para los datos de temperatura, potencia térmica transferida y flujo de calor, respectivamente. Por lo tanto, la implementación de la PSA permitió un mejor aprovechamiento de la energía térmica de los gases de combustión, lo que aumenta la eficiencia energética del proceso.

Conclusiones

Los perfiles de temperatura medidos permiten establecer la bondad de ajuste del modelo basado en CFD como una herramienta para el análisis y diseño de pailas en unidades productoras de panela. La implementación de la paila semicilíndrica con aletas permite un mejor aprovechamiento de la energía térmica de los gases de combustión en comparación con la paila sin aletas. El modelo CFD implementado permite diseñar módulos de producción de panela más eficientes, lo que permite un aumento de la velocidad de evaporación y, por ende, un aumento de la producción (>5 %), además de la mitigación de impactos ambientales. Con la nueva geometría del evaporador, se pudo aumentar la cantidad de calor aprovechado de los gases de combustión, con un incremento del 22 % en la tasa de transferencia de calor respecto a la paila sin aletas. Con el diseño propuesto se aumentó el área de transferencia de calor, lo cual es requerido para aprovechar la transferencia de calor por convección. Además, la geometría semicilíndrica permite mejorar la transferencia de calor por radiación, debido al efecto de visión generado en el seno del ducto, por lo que es una alternativa para el intercambio de calor en la que predomina la transferencia entre radiación y convección. Finalmente, las mejoras para aumentar el aprovechamiento térmico del proceso tuvieron un efecto positivo en la calidad final de ANC, en términos de color y contenido de sacarosa.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de AGROSAVIA y al equipo de investigación del proyecto “Prototipo de sistema de evaporación y recomendaciones de implementación para la producción de panela a pequeña y/o mediana escala” por el desarrollo de la investigación.

Referencias

Amosun, A., Gbabo, A., & Wada, A. C. (2000). Open pan sugar processing technology: An option for developing countries. *Sugar Tech*, *2*(1), 19-22. https://doi.org/10.1007/BF02945739

Ansys. (2013). *Ansys Fluent theory guide: Release 16.2*.

Anwar, S. I. (2010). Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans. *Energy Conversion and Management*, *51*(2), 360-364. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.033

Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, *274*, artículo 109843. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843

Hottel, H. C., & Sarofim, A. F. (1970). Models of radiative transfer in furnaces. *Journal of Engineering Physics*, *19*(3), 1.102-1.114. https://doi.org/10.1007/BF00826234

Jaffé, W. R. (2015). Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis*, *43*, 194-202. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.06.007

La Madrid, R., Marcelo, D., Mendoza Orbegoso, E., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, *125*, 107-120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005

Menter, F. R. (1993, 6-9 de julio). *Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows* [presentación en conferencia]. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, Orlando, Florida, Estados Unidos. https://doi.org/10.2514/6.1993-2906

Modest, M. F., & Mazumder, S. (2021). *Radiative heat transfer* (4.ª ed.). Academic Press.

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

Rohsenow, W. M. (1951). *A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids.* MIT.

Sardeshpande, V. R., Shendage, D. J., & Pillai, I. R. (2010). Thermal performance evaluation of a four pan jaggery processing furnace for improvement in energy utilization. *Energy*, *35*(12), 4.740-4.747. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.018

Velásquez, F., Espitia, J., Hernandez, H., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2021). Improving the thermal, productive, and environmental performance of a non-centrifugal cane sugar production module using a heat recovery system. *Journal of Food Engineering*, *308*, artículo 110688. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110688

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2.ª ed.). Pearson Education.

Capítulo 10

Modelo híbrido de evaporación para la producción de azúcar no centrifugada de caña de azúcar

John Javier Espitia González, Fabián Andrés Velásquez Ayala, Henry Alberto Hernández Martínez, Oscar Andrés Mendieta Menjura y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

En la producción de azúcar no centrifugada de caña (ANC), la eficiencia energética del proceso varía significativamente según la tecnología implementada, por lo que la optimización del uso de la energía se vuelve fundamental para el proceso en terminos de competitividad y sostenibilidad. El objetivo de este trabajo de investigación fue implementar un sistema híbrido de evaporación ajustado a las condiciones de operación del departamento de Nariño (Colombia). Para alcanzar el objetivo, se realizó el diseño del sistema considerando un flujo mixto de energía (gases de combustión y vapor) al jugo de caña. Posteriormente, se realizó la construcción y evaluación del sistema híbrido de evaporación, y se obtuvo como resultado un sistema con una eficiencia térmica global entre el 48 y el 53 %, lo que permite un mejor aprovechamiento del poder calorífico del combustible, la reducción de un 27 % en el índice de kg de bagazo/kg de ANC y, por ende, una disminución del 13 % en los índices de emisión de CO y del 77 % en los de CO_2/kg de ANC.

Palabras clave: eficiencia térmica global, panela, hornilla, productividad, sostenibilidad

Introducción

El proceso de elaboración de azúcar no centrifugada de caña (ANC) generalmente se realiza en una hornilla, la cual está compuesta por una cámara de combustión, donde se genera la energía térmica; un sistema de intercambiadores de calor (pailas), donde se evapora el agua que contienen los jugos de la caña de azúcar con la energía térmica generada en la combustión, y una chimenea, por donde se emiten los gases exhaustos del proceso. El proceso de evaporación del jugo de caña de azúcar se puede dividir en tres etapas térmicas: clarificación, evaporación y concentración (Rodríguez et al., 2018). La eficiencia térmica global del proceso se define como la cantidad de energía aprovechada para evaporar el agua de los jugos a través del sistema de intecambiadores de calor (evaporadores abiertos o pailas) en relación con la energía generada en el proceso de combustión.

La eficiencia térmica global de los sistemas tradicionales de producción de ANC depende de la capacidad de producción. Sistemas de producción pequeños (<100 kg de ANC/h) reportan eficiencias del 30 %, mientras que los de mediana escala (entre 100 y 180 kg de ANC/h) reportan eficiencias alrededor del 45 %. Los sistemas de gran escala (>250 kg de ANC/h), por su parte, incorporan tecnologías de vapor y vacío, lo cual permite tener eficiencias alrededor del 64 %. Por lo tanto, al analizar los sistemas de producción de pequeña y mediana escala, se puede plantear la mejora de sus desempeños energéticos sin depender de la capacidad de producción.

Se ha encontrado que en los sistemas de producción de pequeña y mediana escala la temperatura de los gases exhaustos que salen por la chimenea puede llegar a los 700 °C. Esto indica que el sistema de pailas no está aprovechando adecuadamente la energía generada en la combustión, por lo que se tiene un proceso ineficiente. Lo anterior se traduce en menores velocidades de evaporación y, por ende, en un mayor tiempo de exposición de los jugos al tratamiento térmico, lo que podría afectar la

calidad e inocuidad de la panela (Prada et al., 2015), incrementar el consumo de combustible y generar un mayor índice de gases de efecto invernadero (Velásquez et al., 2021).

Para mejorar el desempeño energético y productivo del proceso de producción de ANC, se han empleado diferentes estrategias, entre las cuales se puede destacar el diseño de intercambiadores de calor (pailas) en función del fenómeno de transferencia de calor dominante en el ducto de gases (radiación o convección). Estas investigaciones han permitido que hoy se pueda contar con pailas pirotubulares, planas o acanaladas (con o sin aletas), que se ubican en la parte del ducto donde domina la transferencia de calor por convección (sección mas alejada de la cámara de combustión), así como con pailas con geometrías semicilíndricas o semiesféricas, usadas en la parte del ducto donde domina la transferencia de calor por radiación (La Madrid et al., 2017). Sin embargo, se requerie un analísis más profundo del proceso, vía modelización y optimización, que permita mejorar dicho desempeño. Es por eso que los modelos de dinámica de fluídos computacional (CFD, por sus siglas en ingles) se utilizan como herramienta numérica para predecir y mejorar el rendimiento térmico de unidades de producción de panela. La Madrid et al. (2016) diseñaron una paila pirotubular que podría reemplazar una paila plana con aletas, utilizando un modelo de CFD como herramienta numérica. Los resultados del estudio mostraron que, para las etapas térmicas de calentamiento, clarificación y evaporación, la energía térmica utilizada aumentó significativamente, lo que permitió incrementar la eficiencia térmica global del proceso del 31,4 al 42,8 %, así como la producción de panela en un 25 %.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue mejorar el desempeño energético y ambiental de las unidades productoras de panela de pequeña y mediana escala, mediante el ajuste de un sistema híbrido de evaporación que aprovecha el calor de los gases exhaustos que salen por la chimenea, usando un sistema de recuperación de calor (SRC) para producir vapor y retornarlo al proceso.

Metodología

La metodología se dividió en tres etapas: diseño, construcción y evaluación. Inicialmente, se diseñó una hornilla con el sistema híbrido de evaporación, con el *software* Autodesk Inventor, según la cantidad de ANC proyectada. A partir de la cantidad de calor que podría ser aprovechada de los gases en la sección de la chimenea, se desarrolló un SRC basado en un intercambiador de coraza y tubos. Posteriormente, se construyó el sistema híbrido de evaporación para la producción de ANC en la vereda San Isidro, del municipio de Ricaurte, Nariño (Colombia), a 1.293 m s. n. m. El sistema fue diseñado con una capacidad de 90 kg de ANC/h. Se evaluó la capacidad real instalada del prototipo construido y se validaron los resultados de los indicadores de desempeño energético y ambiental para los cuales fue diseñado. Por último, se realizó un análisis de la viabilidad económica del sistema implementado, para determinar el tiempo de retorno de la inversión según el precio de venta del producto.

Diseño

Hornilla

La capacidad de la hornilla se calculó de acuerdo con la información descrita en la tabla 10.1. Asimismo, la información de dicha tabla fue considerada para realizar el análisis de viabilidad económica.

Para el diseño de la unidad productora de panela, se empleó el modelo 0D (Espitia et al., 2020), que permite prever la cantidad de energía necesaria y las áreas de intercambio de energía. Para completar los ajustes y las dimensiones de la cámara de combustión y la altura de la chimenea, se empleó el manual de hornillas paneleras de Gordillo Ariza y García Bernal (1992). El modelo y orden de flujo de la hornilla propuesta se presentan en la figura 10.1.

El esquema de proceso propuesto en la figura 10.1 se realizó para respetar el orden de flujo empleado en el departamento de Nariño;

el flujo de los jugos inicia con la etapa térmica de clarificación en el intercambiador 5; posteriormente, se pasa a la etapa térmica de evaporación en los intercambiadores 1 y 2, y finalmente a la etapa térmica de concentración en los intercambiadores 3 y 4.

Tabla 10.1. Datos de entrada para el diseño de una hornilla con sistema híbrido de evaporación

Variable	Unidad	Valor
Área de caña sembrada	ha	25
Periodo vegetativo	Meses	15
Caña por hectárea esperada	t/ha	59
Concentración de sólidos solubles (css) de la caña	°Bx	17
Jornada de trabajo	Semanas	2
Días de trabajo por semana	Días	4
Horas al día	h	14

Fuente: Elaboración propia

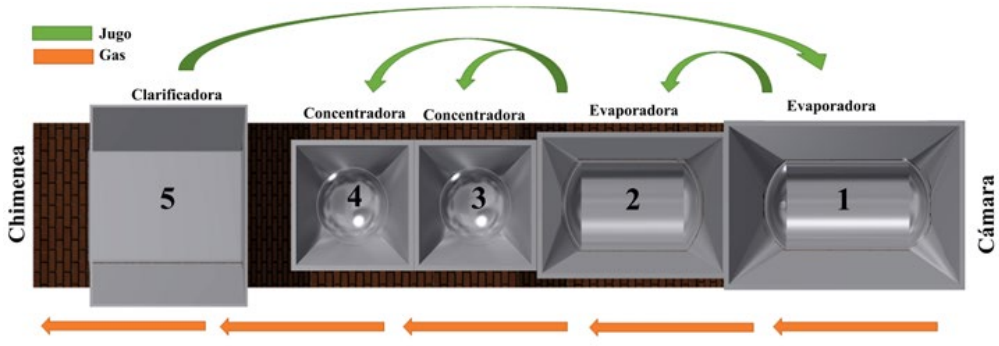


Figura 10.1. Modelo de hornilla utilizado para la implementación del sistema híbrido de evaporación. 1. Paila semicilíndrica; 2. Paila semicilíndrica con aletas; 3 y 4. Pailas semiesféricas; 5. Paila plana con aletas.

Fuente: Elaboración propia

Sistema de recuperación de calor (SRC)

El SRC descrito en la figura 10.2 se diseñó según la metodología reportada por Velásquez et al. (2021); este sistema se diseñó para producir vapor saturado a 690 kPa con el calor residual de los gases de combustión que pasan por la chimenea. El SRC está compuesto por los siguientes elementos:

- Caldera acuotubular: sistema de coraza y tubos con arreglo triangular (el agua va por los tubos, y los gases de combustión exhaustos, por la coraza).
- Tres serpentines (circuito de tubos en contacto con los jugos, por donde pasa el vapor), dispuestos en un tanque precalentador de jugo (tanque externo al ducto de gases), en una paila clarificadora y en una paila evaporadora.
- Tanque pulmón de agua para recibir los condensados y para proveer de agua a la caldera, lo que configura un ciclo cerrado del agua.
- Trampas de vapor a la salida de cada serpentín para permitir la recirculación del agua condensada al tanque pulmón.

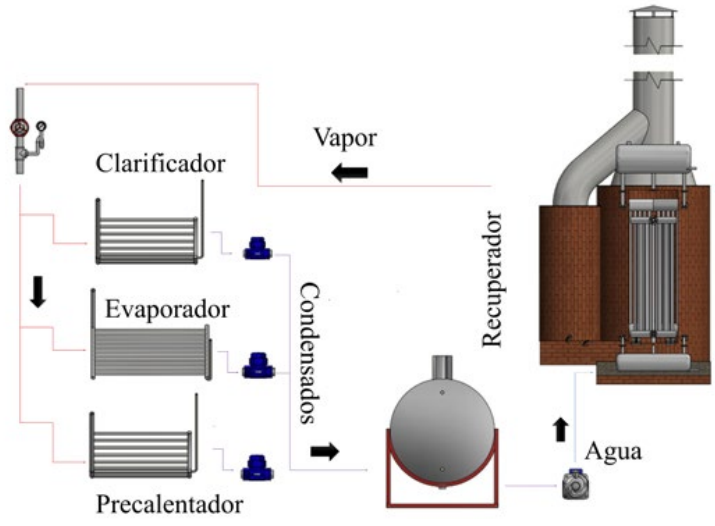


Figura 10.2. Sistema de recuperación y aprovechamiento de calor.

Fuente: Elaboración propia

Evaluación de la hornilla con el sistema híbrido de evaporación

Las mediciones se realizaron para tres lotes de producción de ANC, en condiciones normales de funcionamiento, al alcanzar el equilibrio térmico (después del calentamiento de la hornilla y del agua del tanque pulmón del recuperador). A continuación, se presentan las variables medidas.

Flujo másico y contenido de humedad del combustible

El flujo másico del bagazo suministrado a la cámara de combustión se determinó pesando tres lotes de bagazo (150 kg) con una balanza electrónica KERN HCB 200K500, y se midió el tiempo que tardó en quemarlo. El contenido de humedad del bagazo se determinó de acuerdo con las normas de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000), usando un secador convectivo.

Temperatura

Se instaló un termopar tipo K sobre la cámara de combustión y se conectó a un sistema de adquisición de datos (Intech Micro 2100-A16) programado para registrar mediciones cada 60 s durante cada lote de producción.

Composición de los gases de combustión

Las mediciones se realizaron en la chimenea a una altura de 4 m desde la base. La composición volumétrica de CO_2, CO y O_2 se estableció con un analizador Testo 350 S/XL. Las mediciones se realizaron durante 30 min con un intervalo de tiempo de 15 s.

Concentración de sólidos solubles (CSS)

La CSS se midió utilizando refractómetros digitales Atago modelos PAL-1 y PAL-2 de 0 a 53 °Bx y de 45 a 93 °Bx, respectivamente. Las mediciones se realizaron en cada intercambiador de calor, midiendo la CSS en cada movimiento de los jugos (la CSS de los jugos a la salida de un intercambiador de calor corresponde a la

CSS de entrada del subsiguiente intercambiador de calor), para determinar la energía aprovechada por cada intercambiador de calor dentro de la hornilla.

Capacidad de producción

Se midió la masa fría de ANC producida en cada lote, así como el tiempo de producción. Las mediciones se realizaron con una balanza Lexus Fenix con una capacidad de 30 kg y con un cronómetro.

Viabilidad económica

Se determinaron la rentabilidad del proyecto, los costos de fabricación del equipo y el retorno de la inversión. La evaluación fue realizada considerando un proyecto de creación de una hornilla nueva, desde cero. Para el análisis de viabilidad económica, se tuvieron en cuenta los indicadores de rentabilidad de valor presente neto y tasa interna de retorno. Los parámetros empleados durante la evaluación se describen a continuación.

Costos de construcción e instalación

Corresponden al total de los costos de la fabricación de los intercambiadores, la construcción de la hornilla (incluida la demolición), el montaje del SRC y el sistema de control eléctrico, y la mano de obra durante la construcción de la hornilla.

Costos operativos

Son los costos inherentes al proceso de producción: personal operativo, suministros (caña, empaques y aditivos), energía eléctrica o combustible para el motor del molino y mantenimiento de equipos. Estos valores cambian dependiendo de la región de producción.

Ingresos

Los ingresos son obtenidos de la venta de la panela empacada, considerando como precio base el pagado directamente al productor: COP 1.800/kg (año 2019); este valor se multiplicó por la producción anual, a fin de obtener un flujo total de caja.

Resultados y discusión

Diseño

Balance de masa y energía

Para la evaluación se midieron todas las variables consideras en el diseño. Los flujos másicos de entrada y salida obtenidos del balance de masa para la hornilla propuesta de 90 kg de panela/h se describen en la tabla 10.2. Para efectos de cálculos, se asumieron los valores porcentuales de cachaza y bagacillo del 2,3 y el 1 %, respectivamente. Adicionalmente, las CSS del jugo de caña y el ANC consideras fueron de 17 y 93 °Bx, respectivamente. Para las condiciones de proceso establecidas, se determinó que el bagazo permitía entregar un flujo de calor de 976,4 kW. Asimismo, se determinó el flujo de calor requerido para evaporar el agua del jugo (303,2 kW), con lo cual se calculó la eficiencia térmica global del proceso (31,07 %).

Tabla 10.2. Resultados del balance de materia para la hornilla de 90 kg de ANC/h con un molino Apolo 4C

Variable	Valor
Caña de azúcar molida (kg/h)	877,9
Jugo obtenido (kg/h)	526,7
Bagacillo residual en filtros (kg/h)	10,5
Jugo prelimpiado (kg/h)	516,2
Cachaza (kg/h)	20,6
Jugo clarificado (kg/h)	495,6
Bagazo suministrado (30 % b. h.) (kg/h)	299,1

Fuente: Elaboración propia

Potencia térmica y áreas de transferencia de calor

Para cada etapa térmica se calculó la potencia térmica requerida y se determinó el área de intercambio de calor requerida en función de la ubicación (tabla 10.3). Para el caso del intercambiador de

calor número 2 (evaporadora 2), se observa que tiene 3,59 m^2 en la superficie de contacto con los gases de combustión, siendo la paila de mayor área de intercambio de calor en la hornilla, debido a las aletas que se incluyeron. Este intercambiador se usa para el proceso de evaporación. Por su forma geométrica semicilíndrica con aletas, se ubica específicamente en la zona del ducto donde se tienen fenómenos de transferencia de calor intermedio entre radiación (se usan geometrías redondas) y convección (las aletas generan una mayor área de transferencia de calor). Adicionalmente, al analizar el valor de la potencia consumida, se observó que en la etapa térmica de evaporación es cuando más se requiere potencia térmica, ya que los requerimientos energéticos son mayores para concentrar el jugo de caña de 21 a 70 °Bx, lo cual significa evaporar agua. Para la etapa térmica de clarificación, se observó que el intercambiador de calor número 5 (paila plana con aletas) presenta un área de transferencia de calor de 12,1 m^2, debido a que el lugar donde se encuentra gobierna la transferencia de calor por convección, por lo que la estrategia para aprovechar el calor es aumentar el área de transferencia de calor.

Tabla 10.3. Resultados del balance de energía para la hornilla de 90 kg de ANC/h y áreas de transferencia de calor de los intercambiadores

Etapa	Potencia térmica consumida (kW)	Tipo de paila (número)	Área de transferencia de calor sin aletas (m^2)	Área de transferencia de calor con aletas (m^2)
Evaporación	167,285	Semicilíndrica (1)	1,9	No aplica
		Semicilíndrica con aletas (2)	1,4	3,6
Concentración	41,266	Semiesférica (3)	0,6	No aplica
		Semiesférica (4)	0,6	No aplica
Clarificación	94,688	Plana con aletas (5)	2,5	12,1

Fuente: Elaboración propia

Sistema de recuperación de calor (SRC)

El diseño del SRC se basó en una caldera acuotubular conformada por un sistema de tubos (figura 10.3). Para su dimensionamiento, se tuvo en cuenta la temperatura de los gases a la entrada de la chimenea (597,2 °C), valor con el cual se determinó el área de intercambio de calor requerida para aprovechar la potencia térmica de los gases exhaustos de combustión. Asimismo, se consideró un coeficiente global de transferencia de calor de 28 kW/m^2K, obtenido previamente en un prototipo experimental construido en la sede Cimpa de AGROSAVIA.

El recuperador del sistema cuenta con un área de transferencia de calor de 40,5 m^2, que permite recuperar alrededor de 185,7 kW. La cantidad de energía recuperada se utiliza para producir vapor y retornarlo al proceso. Los resultados de desempeño del diseño de la hornilla con y sin recuperador se presentan en la tabla 10.4. Finalmente, los componentes de la hornilla con el sistema híbrido de evaporación se muestran en la figura 10.3.

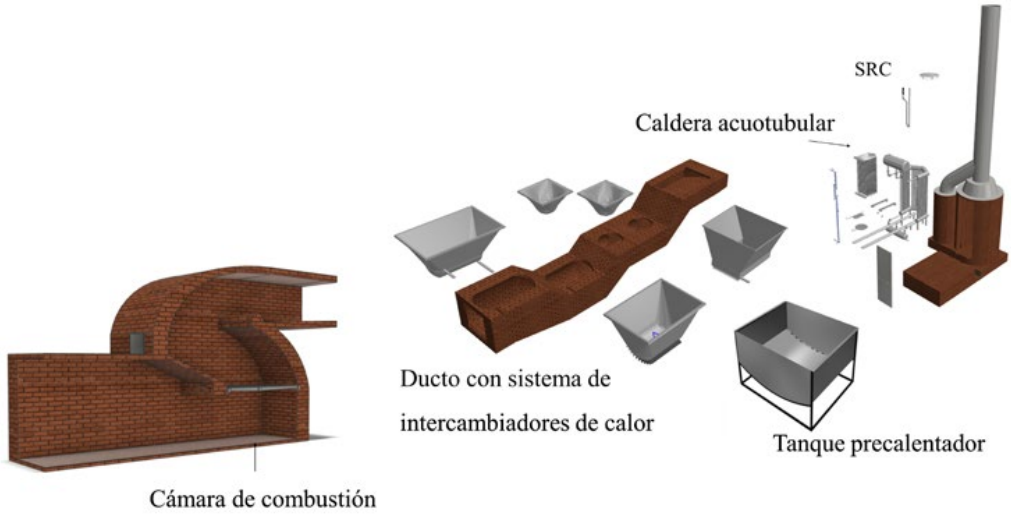


Figura 10.3. Hornilla con el sistema híbrido de evaporación.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10.4. Resultados de desempeño energético, productivo y ambiental de una hornilla con y sin SRC

Variable	Valor sin recuperador	Valor con recuperador
Consumo de combustible (kg de bagazo/kg de ANC)	2,3	1,6
Producción (kg de ANC/h)	90,1	129,2
Eficiencia térmica global (%)	31	52
Índice de emisión de CO_2 (kg de CO_2/kg de ANC)	3,8	2,7
Índice de emisión de CO (kg de CO/kg de ANC)	0,13	0,09
¿Es autosuficiente con el uso de bagazo como combustible?	No	Sí

Fuente: Elaboración propia

Evaluación

Energía aprovechada

En cada intercambiador se evalúo la energía aprovechada mediante el cambio en la CSS. El jugo de caña presentó una concentración inicial de 17 °Bx. Los resultados de la evaluación se presentan en la tabla 10.5.

Tabla 10.5. Energía aprovechada en los intercambiadores de calor de la hornilla con sistema híbrido de evaporación

Tipo de pailas	Función	Energía aprovechada (kW)	Cambio de CSS (°Bx)
5. Plana con aletas (serpentín)	Clarificación	146,7	25,6
1. Semicilíndrica (serpentín)	Evaporación	140,8	41,3
2. Semicilíndrica con aletas	Evaporación	105,3	60,5
3 y 4. Semiesféricas (2)	Concentración	41,8	94,0

Fuente: Elaboración propia

Se observó un aumento en el aprovechamiento de la energía; por ejemplo, la paila plana aleteada, a la cual se le había estimado un aprovechamiento de 49,8 kW, alcanzó los 146,7 kW. Por otro lado, precalentar el jugo usando vapor por medio del serpentín (figura 10.2) antes de la etapa térmica de clarificación permitió disminuir el tiempo que se requiere para calentar, lo cual aumentó la velocidad de evaporación del agua y la eficiencia térmica global del proceso.

Desempeño de la unidad productora de panela

La evaluación del desempeño de la hornilla permite establecer la relación de aprovechamiento de recursos desde el punto de vista energético, ambiental y productivo. En la tabla 10.6 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del desempeño de la hornilla. Se resalta que la eficiencia energética después de implementar el SRC (sistema de evaporación híbrido) se incrementó entre el 48 y el 53 % en el proceso de producción de panela, valor que supera al de la hornilla dimensionada sin el SRC (35,06 %) hasta en un 18 %. En términos productivos, la hornilla fue dimensionada para producir 90 kg de ANC/h; sin embargo, con la implementación del SRC, se logró un aumento de la productividad del 33 % en la producción de panela por hora. Asimismo, se observó una reducción del índice de consumo de combustible, al pasar de 2,05 a 1,33 kg de bagazo/kg de ANC, lo cual permitió reducir los índices de emisiones de CO y CO_2.

Viabilidad económica

Para la evaluación financiera, se consideraron los costos totales al final del proyecto (COP 150.633.642), pero, debido a que fue ejecutado en 2019, estos pueden cambiar por efecto del mercado de divisas y la disponibilidad de materiales como el acero. El costo de producción se estimó en COP 1.308/kg de ANC, considerando los datos de la tabla 10.1 y los honorarios de la zona rural de Nariño, los costos de las materias primas, los insumos, la energía y el combustible. Para el flujo de caja, se estableció un precio mínimo de venta de COP 1.800/kg de ANC. Adicionalmente,

se tuvo en cuenta la depreciación del prototipo en veinte años, con el modelo en línea recta, y un valor de salvamento como chatarra de COP 10.000.000.

Con esta información, se determinó un valor presente neto de COP 272.556.436 y una tasa interna de retorno del 26,35 %, y se estimó el tiempo de retorno de la inversión con diferentes precios de venta directos al productor de ANC (figura 10.4). De esta forma, la rentabilidad promedio anual, la escala de producción y las condiciones de operación permiten aseverar que es un proyecto viable económicamente.

Tabla 10.6. Resultados de desempeño energético, productivo y ambiental de la hornilla tradicional inicial y con el sistema híbrido de evaporación

Variable	Hornilla tradicional inicial	Con sistema híbrido de evaporación
Consumo de combustible (kg de bagazo/kg de ANC)	1,84* ± 0,6	1,33 ± 0,4
Producción (kg de ANC/h)	65,52 ± 3,6	119,69 ± 5,2
Eficiencia térmica global (%)	31,20 ± 5,3	48,46 ± 1,8
Índice de emisión de CO_2 (kg de CO_2/kg de ANC)	2,95 ± 0,8	2,54 ± 0,09
Índice de emisión de CO (kg de CO/kg de ANC)	0,102 ± 0,07	0,02 ± 0,005
¿Es autosuficiente?	No	Sí

* +0,488 kg de leña/kg de panela

Fuente: Elaboración propia

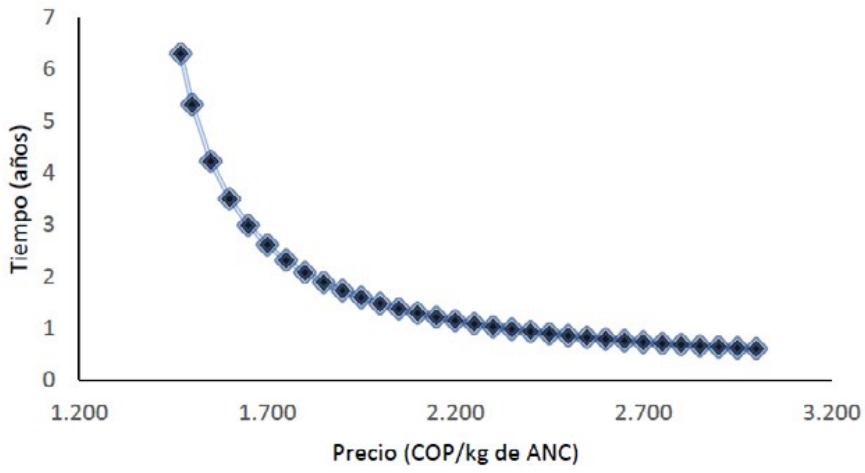


Figura 10.4. Análisis de sensibilidad del tiempo de recuperación de la inversión de la hornilla con sistema híbrido de evaporación en función del precio de la panela (ANC).

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La implementación de un SRC aumenta significativamente la eficiencia de una unidad productora de panela, con lo que se evita el uso de otros combustibles adicionales para su funcionamiento, lo cual tiene un efecto en los costos de producción y genera un impacto positivo en el medio ambiente. Con el sistema híbrido de evaporación, es posible incrementar la capacidad de producción de las hornillas, ya que para producir 120 kg de ANC/h se dimensionó una hornilla de 90 kg de ANC/h. Este sistema se presenta como opción para disminuir la brecha tecnológica en cuanto a la eficiencia térmica global presente entre los pequeños y medianos productores de la cadena productiva.

Agradecimientos

Agradecemos a la Gobernación de Nariño y al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en el marco del convenio 1976 y a los demás integrantes

del proyecto "Mejoramiento de la eficiencia del proceso de combustión de bagazo y de transferencia de calor en los trapiches paneleros, mediante la implementación de quemadores de biomasa y sistemas pirotubulares de transferencia de calor".

Referencias

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis* (17.ª ed.).

Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, *274*, artículo 109843. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843

Gordillo Ariza, G., & García Bernal, H. R. (1992). *Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

La Madrid, R., Marcelo, D., Mendoza Orbegoso, E., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, *125*, 107-120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005

La Madrid, R., Mendoza Orbegoso, E., Saavedra, R., & Marcelo, D. (2017). Improving the thermal efficiency of a jaggery production module using a fire-tube heat exchanger. *Journal of Environmental Management*, *204*(parte 1), 622-636. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.035

Prada, L. E., García, H. R., & Chaves Guerrero, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *16*(1), 7-23. http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v16n1/v16n1a02.pdf

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

Velásquez, F., Espitia, J., Hernandez, H., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2021). Improving the thermal, productive, and environmental performance of a non-centrifugal cane sugar production module using a heat recovery system. *Journal of Food Engineering*, *308*, artículo 110688. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110688

Capítulo 11

Sistema experto para el diseño de hornillas térmicamente eficientes (HornillApp)

Henry Alberto Hernández Martínez, Oscar Andrés Mendieta Menjura, Paula Helena Reyes Herrera, John Javier Espitia González, Fabián Andrés Velásquez Ayala, Luz Esperanza Prada Forero y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

En Colombia existen cerca de 20.000 unidades productoras de panela (UPP), u hornillas, pero no se ha determinado una cifra exacta sobre cuántas han sido construidas con un criterio técnico especializado (Invima, 2015). No obstante, las UPP construidas sin un criterio técnico no son sistemas autosuficientes y requieren el uso de combustibles diferentes al bagazo (leña, caucho o carbón) para suplir las demandas energéticas del proceso, lo cual se ve reflejado en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y de los costos de producción del producto. Por lo tanto, este capítulo presenta una solución parcial a esta problemática, con una aplicación de uso libre para el diseño automatizado de UPP, titulada HornillApp, la cual elimina el costo del estudio de diseño de construcción de una hornilla panelera.

La aplicación HornillApp se modeló con cuatro componentes a nivel computacional: 1. una interfaz gráfica que le permite al usuario ingresar datos del sistema productivo y recibir un reporte con el resultado; 2. un modelo de cero dimensiones (modelo 0D) que permite encontrar las dimensiones de la chimenea, el ducto y la cámara de combustión, de acuerdo con el sistema productivo, para optimizar la eficiencia térmica y reducir el impacto ambiental; 3. una base de datos con información necesaria para los modelos

computacionales, los costos de los componentes y los datos históricos del precio de la panela; y 4. una rutina que, a partir del diseño semidetallado, estima un costo económico y realiza una proyección económica con el tiempo de retorno de la inversión. Vale la pena resaltar que el modelo 0D incorporado a la herramienta es un trabajo previo cuyos resultados se basan en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y una validación en campo con datos de siete hornillas (Espitia et al., 2020).

Una de las ventajas de HornillApp es que es gratuita; esta se publicó en julio de 2021 y después de un año de funcionamiento recibió cerca de 5.000 visitas, de las cuales el 88 % fue en Colombia. Además, esta aplicación se convierte en un canal de transferencia de conocimiento sobre la construcción de hornillas a productores paneleros, ya que entrega una proyección económica que les permite evaluar la viabilidad de adoptar este tipo de tecnología.

Palabras clave: modelo computacional, algoritmos de optimización, hornilla panelera

Introducción

En las unidades productoras de panela, comúnmente conocidas en Colombia como "trapiches", se extrae y procesa el jugo de los tallos de la caña de azúcar para obtener panela. La mayoría de los trapiches cuentan con una hornilla, en la cual se transforma la energía del bagazo en energía calórica, que se transfiere a través de unos intercambiadores de calor al jugo para su concentración en sistemas de evaporación abierta (Rodríguez et al., 2018). Una hornilla está conformada por una cámara de combustión, un ducto, una chimenea y un tren de intercambiadores de calor (pailas). Las pailas tienen diferentes geometrías (planas, pirotubulares, acanaladas, semiesféricas y semicilíndricas, con o sin aletas) y cuentan con falcas, como sistema de seguridad para evitar accidentes en la zona de trabajo. La capacidad de producción de las hornillas puede variar desde 75 hasta 225 kg de panela/h, y estas

pueden operar con bagazo verde o seco, según el tipo de cámara (Ward o plana, respectivamente) (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], s. f.; Velásquez et al., 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, AGROSAVIA desarrolló dos variantes de hornilla con el fin de mejorar algunos aspectos del proceso de producción panelera tradicional. La primera es la hornilla tipo Cimpa, que modifica la cámara de combustión para mejorar la eficiencia térmica global. La segunda es el modelo de evaporación híbrido para hornillas, que introduce un recuperador de calor para incrementar la eficiencia térmica y la capacidad de producción. Este recuperador es un sistema acuotubular que aprovecha la energía residual de los gases de combustión en la chimenea para generar vapor y retornarlo al proceso (AGROSAVIA, s. f., 2021).

En todos los casos, los artefactos que componen la hornilla son conjuntos de elementos que requieren un estudio para garantizar un funcionamiento apropiado. Estos estudios son realizados por personas especializadas en el proceso y con conocimientos de ingeniería, lo que incrementa el costo de construcción hasta en un 20 %. Por lo tanto, la tendencia de producir panela en hornillas construidas sin un criterio técnico confiable disminuye la posibilidad del productor panelero de ser competitivo en el mercado regional (Ferrer Cruz et al., 2013). Asimismo, las hornillas construidas sin un criterio técnico apropiado tienen una baja eficiencia térmica global (energía aprovechada/energía suministrada), requieren combustibles adicionales al bagazo para suplir las demandas energéticas del proceso (leña, caucho o carbón), producen altas emisiones de gases de efecto invernadero, alteran la calidad de la panela y disminuyen la rentabilidad o utilidad del agronegocio (Ferrer Cruz et al., 2013; Hernández Restrepo, 2004; Jagannadha Rao et al., 2009; La Madrid et al., 2016; Soler Villamizar & Gómez Tovar, 2004; Tarazona Parra, 2011).

El diseño de hornillas ha sido estudiado desde los años ochenta para mejorar la eficiencia térmica y, así, aumentar tanto la producción de panela como la construcción de hornillas con

estudios técnicos. Entre las contribuciones más sobresalientes, se encuentran el diseño basado en resultados de simulaciones termodinámicas de la combustión del bagazo (García & Sánchez, 2007); el modelo matemático que describe el funcionamiento de una cámara Ward-Cimpa (Castillo et al., 2004; Prada Forero et al., 2012; Sánchez Castro et al., 2013); la herramienta Dr Horpa, que determina el tamaño de la hornilla y el molino según las condiciones del cultivo de caña de azúcar (AGROSAVIA, s. f.; Camacho & Núñez, 2012), y el modelo de cero dimensiones (0D), que corrige las dimensiones y la geometría de las pailas en función de la capacidad de la hornilla, para lograr la autosuficiencia energética (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021). En 2018, AGROSAVIA, con la financiación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), en el marco del proyecto "Estrategias de proceso para mejorar la inocuidad y calidad de la panela", inició el desarrollo de una aplicación llamada Sistema Experto (SE) para facilitar el diseño de hornillas tipo Cimpa térmicamente eficientes, bajo los parámetros técnicos apropiados, dirigida a usuarios sin conocimiento de ingeniería especializada.

La incorporación del SE (HornillApp) en el sector productivo panelero reduce la brecha entre el sector agrícola y las tecnologías de la información. Por lo tanto, este capítulo presenta la contribución realizada por AGROSAVIA con su aplicación HornillApp: una herramienta basada en *software* compuesta por un algoritmo de aprendizaje computacional y una interfaz gráfica amigable con el usuario (Velásquez et al., 2021).

Metodología

HornillApp se desarrolló en tres etapas: 1) construcción del algoritmo para sistematizar las tareas de diseño de ingeniería, 2) definición de los requerimientos computacionales y 3) programación, validación y despliegue de la aplicación en un servidor.

En la primera etapa se definió la arquitectura de la aplicación para su desarrollo, la forma de acondicionar los modelos matemáticos en términos del lenguaje de programación y las propiedades de los materiales de construcción de la hornilla para modelar la propuesta de valor. En la segunda etapa se seleccionó el lenguaje de programación teniendo en cuenta características como la versatilidad, la complejidad, el acceso y el tipo de licencia, lo que permitió el desarrollo de librerías y componentes necesarios para consolidar la aplicación. En la tercera etapa, la aplicación se desplegó en un servidor de desarrollo, antes de realizar la instalación en el servidor corporativo de AGROSAVIA y compartir la aplicación al público. Vale la pena resaltar que la validación de HornillApp se realizó con personal técnico experto en el diseño de hornillas y con productores paneleros, quienes compararon los resultados de la aplicación con mediciones hechas en hornillas reales (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021); con base en esto, se definió la información básica que se solicita al usuario en la interfaz gráfica, la cantidad de diagramas mecánicos y la forma de presentarlos, y el valor de los materiales de construcción en el mercado local y de los insumos para la puesta en servicio de la unidad productora de panela (UPP).

Una vez establecidos los parámetros del desarrollo en las etapas uno y dos, se definió HornillApp como una aplicación de uso libre y gratuito que presenta estudios de factibilidad para la construcción de hornillas paneleras ecoeficientes tipo Cimpa. Los estudios se generan con base en los cálculos aproximados realizados por una rutina de diseño fundamentada en el modelo 0D (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021), así como en información de bases de datos y del usuario, para dimensionar los componentes de la hornilla y estimar su valor comercial de implementación. Por lo tanto, la aplicación HornillApp se dividió en tres partes: el núcleo, el sistema de información y la interfaz gráfica.

Por un lado, el núcleo y el sistema de información son estructuras del programa que gestionan la información de las bases de datos, a partir de los resultados obtenidos con algunos modelos matemáticos,

para dimensionar y tazar los elementos que conforman la hornilla (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021). Por otro, la interfaz gráfica presenta el estudio de factibilidad en varias secciones, para facilitar la comprensión por parte del usuario final.

El ambiente gráfico de la interfaz se implementó usando hojas de estilo tomadas de Bootstrap, y se programó en lenguaje HTML 5, para su visualización en computadores y dispositivos móviles. En la visualización, se presenta la información con formularios interactivos hechos con JavaScript para asignar valores iniciales a los modelos matemáticos del núcleo y gestionar el sistema de información desde la interfaz de usuario. Las funciones nativas, como asignar valores iniciales o gestionar la base de datos, son rutinas que se ejecutan en segundo plano para automatizar el diseño de la hornilla. Además, las rutinas automatizadas son estructuras de código programadas en lenguaje Python y SQL, para facilitar el desarrollo de la aplicación.

Una de las estructuras visibles diseñada en Python es la proyección económica, que se estima en segundo plano y refleja los resultados en la interfaz gráfica mediante un informe que puede descargarse por el usuario. La presentación de los resultados inicia con el valor aproximado de implementación de la hornilla, que se estima a partir de los valores comerciales de los elementos de construcción y la mano de obra recopilados del comercio local (estos valores se actualizan cada seis meses). Luego, el valor de implementación se convierte en el valor inicial de los algoritmos que determinan la depreciación del equipo (utilizando el método de línea recta) y que establecen una métrica del tiempo de retorno de la inversión (Chu Rubio, 2021).

Otra característica de la estructura de código desarrollada es que determina la cantidad de usuarios y los lugares del mundo desde los cuales se ha visitado la página para utilizar la aplicación. Las cantidades se estiman utilizando una herramienta diseñada por Google llamada Google Analitics, que es una herramienta de análisis y seguimiento de visitas a sitios web.

Resultados y discusión

El desarrollo de HornillApp incluyó dos componentes principales (figura 11.1): el núcleo y el sistema de información. Por un lado, el núcleo de la aplicación se fundamentó en el modelo 0D, que incorpora un algoritmo de optimización para estimar las dimensiones de las pailas a partir de la cantidad de jugo que se va a procesar en cada una de ellas. Por otro lado, el sistema de información se encarga de procesar la información usando un modelo de red neuronal.

Núcleo de la aplicación

La interfaz de usuario provee un formulario para registrar información personal del usuario y características básicas del cultivo de caña de azúcar. Por un lado, la información personal comprende nombre o razón social, correo electrónico de contacto, teléfono y ubicación. Por otro, la información básica del cultivo contempla características como área cultivada, altura sobre el nivel del mar, periodo vegetativo y rendimiento de la caña, periodicidad de la molienda y tipo de cámara de combustión. Asimismo, la aplicación cuenta con un manual de usuario, disponible para su descarga en la página principal.

Como se observa en la figura 11.1, la información del formulario pasa de la interfaz del usuario al servidor y es usada para determinar parámetros como la capacidad de producción, el volumen de jugo en condiciones ideales, el bagazo producido, la cantidad de pailas y el tipo de cámara de combustión. Luego, el volumen de jugo en condiciones ideales se divide en función de la cantidad de pailas y etapas del proceso.

Una vez definida la cantidad de pailas y el volumen de jugo por etapa, la aplicación genera una configuración de pailas con dimensiones y geometrías arbitrarias e inicia el proceso de optimización de forma iterativa. Asimismo, el modelo 0D estima el volumen de jugo que se procesa en cada etapa en función de las geometrías

y dimensiones generadas de forma arbitraria y lo compara con el volumen de jugo en condiciones ideales, para establecer un margen de error. Los datos del modelo 0D se utilizan para recalcular iterativamente el volumen de jugo en cada paila, para minimizar el error (menor al 10 %). Cuando el proceso termina, la aplicación estima las dimensiones del ducto en función del tamaño de las pailas, la cámara de combustión y la chimenea.

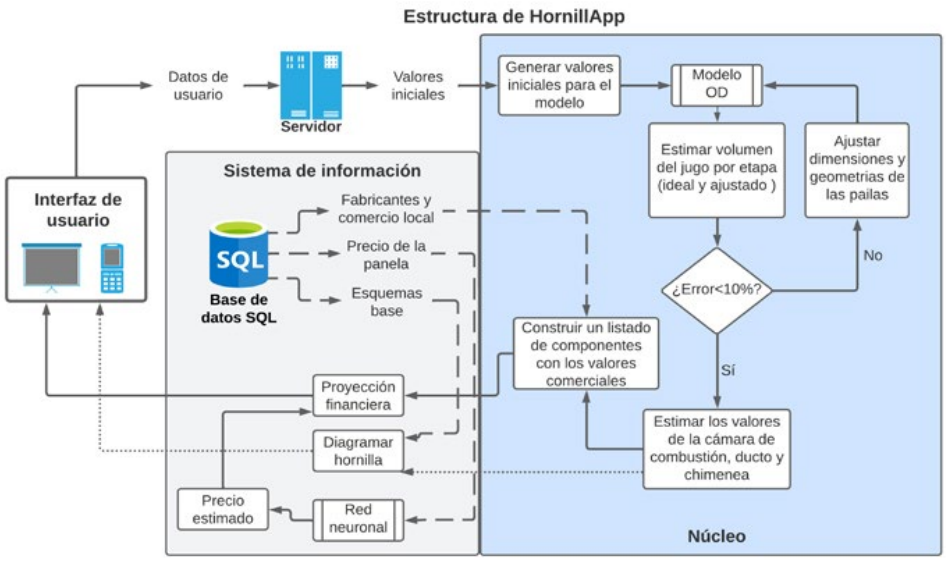


Figura 11.1. Funcionamiento de HornillApp.

Fuente: Elaboración propia

Sistema de información

La aplicación cuenta con un conjunto de bases de datos que contienen información de los usuarios que usan la aplicación o de consulta para la generación del resultado, como las características de la caña de azúcar (rendimiento y contenido de fibra en función de la variedad) y los precios del comercio local de panela y de los materiales que conforman la hornilla. La información de

los usuarios es almacenada cuando finaliza la rutina del diseño de la hornilla. Luego, la aplicación genera un archivo que vincula el resultado obtenido con la información personal del usuario y se almacena en el servidor.

Por otro lado, la información de consulta para generar el resultado se usa en dos momentos durante el diseño de la hornilla. El primer momento es cuando la aplicación lista los materiales de construcción y asocia a ellos un costo. El segundo momento es cuando se realiza la proyección económica, realizada con base en el precio de la panela (que estima el flujo de caja), el tiempo de retorno de la inversión y la depreciación de la hornilla. No obstante, el valor de la panela se determina con una red neuronal entrenada con información histórica del precio de la panela registrado del comercio local (Orjuela Castro & Chavarrio Colmenares, 2011).

Como se observa en la figura 11.1, el sistema de información y el núcleo se ejecutan en la aplicación de forma secuencial; es decir, termina un proceso e inicia otro. Por lo tanto, las características mínimas que necesita el servidor para reducir el tiempo de espera del usuario y ejecutar la aplicación son las siguientes: capacidad de almacenamiento de 1,5 GB disponibles al mes (90 GB durante cinco años para asegurar un funcionamiento continuo, un respaldo con copias de seguridad y la generación de cerca de 20.000 propuestas de valor), 32 GB de memoria RAM, sistema operativo Linux y disponibilidad de cien consultas simultáneas.

Proyección económica

La aplicación presenta los resultados de la proyección económica a través de gráficas, como se muestra en la figura 11.2. En este ejemplo, se muestra la información resultante de generar una propuesta de valor para una hornilla de 75 kg de panela/h, cámara plana, eficiencia del 40 % y disponibilidad de 40 ha de caña de azúcar, con un periodo vegetativo de 18 meses. Teniendo en cuenta las características de la hornilla, la aplicación genera dos gráficas: una, con la información de la tendencia económica de

una hornilla tipo Cimpa (color naranja), y otra, con la proyección de una hornilla con sistema recuperador de calor (color azul). Estas gráficas presentan características como la depreciación de la hornilla (figura 11.2a) y el tiempo de retorno de la inversión (figura 11.2b).

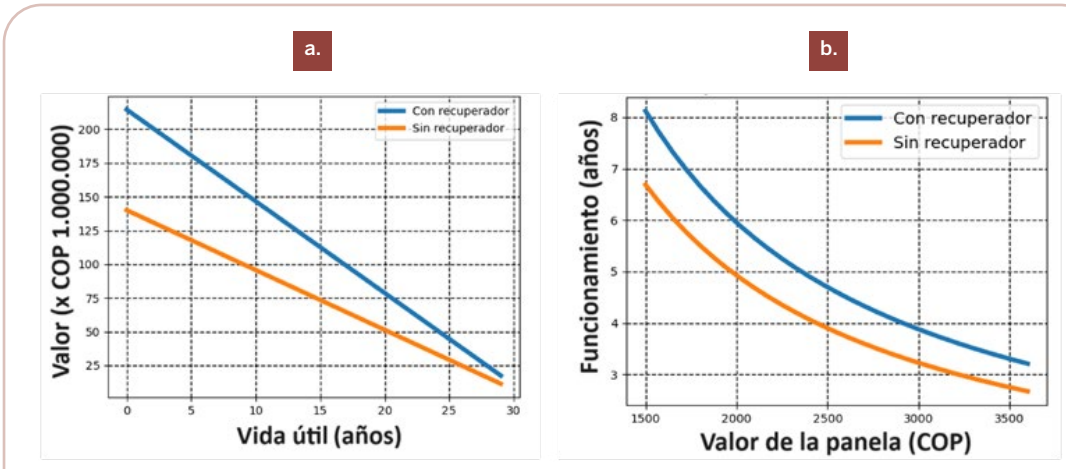


Figura 11.2. Análisis económico de la hornilla con y sin recuperador de calor. a. Depreciación del equipo; b. Tiempo de retorno de la inversión.

Fuente: HornillApp (2021)

Adopción de HornillApp

La aplicación fue dispuesta por AGROSAVIA para uso general de los usuarios el 15 de julio de 2021. El uso de la aplicación se midió utilizando una API (*application programming interface*) de Google llamada Google Analytics, que se encarga de establecer el número de usuarios que han visitado el sitio web y su ubicación geográfica. La API registró información durante los primeros seis meses de funcionamiento de HornillApp y determinó que fue consultada por alrededor de 5.000 usuarios en todo el mundo; el 88 % de los visitantes eran de Colombia (figura 11.3).



PAÍS	USUARIOS
Colombia	648
China	30
United States	17
Ecuador	6
Panama	6
Peru	6
Venezuela	4

Figura 11.3. Datos demográficos de los usuarios de HornillApp.

Fuente: Google Analytics

Finalmente, algunas aplicaciones similares a HornillApp inician con simulaciones termodinámicas de la combustión del bagazo de caña a diferentes humedades y sistematizan el proceso de diseño con un sistema de archivos y ventanas desarrolladas en Visual Basic 4 y Windows 95 (Castillo et al., 2004). Luego está la herramienta Dr Horpa, que presenta dos niveles de operación: uno que le permite al usuario determinar el tamaño de la hornilla, y otro que le permite al técnico especializado en diseño de hornillas dimensionar las partes de la hornilla en función de la transferencia de calor de los gases al proceso (Prada Forero et al., 2012). A diferencia de ellas, HornillApp es una aplicación desarrollada con una interfaz de usuario de alto nivel, intuitiva, multiplataforma y destinada a personas sin conocimientos técnicos o en ingeniería.

Conclusiones

HornillApp es una aplicación de uso libre y gratuito que le permite a un usuario sin conocimientos especializados en ingeniería modelar una solución tecnológica para procesar caña de azúcar

en una hornilla. Esta solución incorpora los planos detallados de las partes de una hornilla tipo Cimpa, una lista de materiales y una proyección de costos para que el usuario evalúe la viabilidad económica de la construcción de la hornilla.

El diseño sistematizado de hornillas paneleras que realiza HornillApp presenta dos ventajas: reduce el tiempo que tarda el diseñador o la empresa que presta el servicio de construcción de hornillas para presentar una propuesta de valor al productor panelero y elimina el costo asociado al estudio de factibilidad económica para la implementación de una hornilla tipo Cimpa.

HornillApp presenta propuestas con valores menores a los conseguidos en el mercado local para la construcción de la hornilla panelera tipo Cimpa, ya que un algoritmo de optimización se encarga de estimar las dimensiones de cada una de las partes de la hornilla en función del área menor requerida para su construcción, de acuerdo con las normas de construcción y seguridad vigentes.

Agradecimientos

Agradecemos a los productores de panela, técnicos, estudiantes, investigadores, entre otros, que nos acompañaron en los seminarios virtuales durante la etapa de lanzamiento de la aplicación HornillApp y expresaron su punto de vista para realizar las mejoras a la interfaz. Asimismo, al MADR por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en desarrollo de la agenda de investigación. Los resultados corresponden al proyecto "Estrategias de proceso para mejorar la inocuidad y calidad de la panela".

Referencias

Camacho, Y. C., & Núñez, K. G. (2012). *Estudio de la influencia del tamaño de partícula y la humedad de combustible sobre el comportamiento de la combustión de bagazo de caña en un horno de lecho fijo* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander].

Castillo, E. F., García, H. R., & Prato, D. (2004, 29 de septiembre-1.º de octubre). *Desarrollo de un modelo matemático para el proceso de combustión de biomasa en hornos de parrilla estacionaria (tipo: Ward-Cimpa y tradicional mejorada)* [presentación en seminario]. VII Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Simads), Bucaramanga, Colombia.

Chu Rubio, M. (2021). El ROI de las decisiones del *marketing*: un enfoque de rentabilidad. Editorial UPC.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (s. f.). Hornillas paneleras ecoeficientes tipo Cimpa. https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/I%C3%ADnea-agr%C3%ADcola/cultivos-transitorios-y-agroindustriales/maquinaria-equipos-instrumentos-y-herramientas/132-hornillas-paneleras-ecoeficientes-tipo-cimpa

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (2021, 31 de mayo). Tecnologías de la caña y la panela más cerca del productor. *Agronet*. https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Tecnolog%C3%ADas-de-la-ca%C3%B1a-y-la-panela-m%C3%A1s-cerca-del-productor.aspx

Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, *274*, artículo 109843. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843

Ferrer Cruz, J. E., Moras Sánchez, C. G., Fernández Cueto, M. J., & Álvarez Palafox, C. (2013). Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. *Revista de la Ingeniería Industrial*, *7*(1), 13-20. https://docplayer.es/29065994-Aplicacion-de-simulacion-para-el-incremento-de-la-productividad-de-una-empresa-generadora-de-panela-en-la-ciudad-de-tuxtepec-oaxaca.html

García, C. E., & Sánchez, Z. (2007). *Comparación del desempeño de algoritmos de optimización avanzada en la síntesis óptima de redes de intercambio de calor* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander].

Hernández Restrepo, R. (2004). *Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para las pailas aleteada, redonda, plana, pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la*

industria panelera [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2004/114445.pdf

HornillApp. (2021). *HornillApp* [aplicación móvil]. http://hornillapp.agrosavia.co:7000/

Invima. (2015). *Establecimientos inscritos en trapiches paneleros* [Registro Nacional de Trapiches Paneleros].

Jagannadha Rao, P. V. K., Das, M., & Das, S. K. (2009). Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar. *Journal of Food Engineering*, *90*(4), 559-566. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.024

La Madrid, R., Marcelo, D., Mendoza Orbegoso, E., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, *125*, 107-120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005

Orjuela Castro, J. A., & Chavarrio Colmenares, I. A. (2011). Caracterización de la cadena de abastecimiento de panela para la provincia de Bajo Magdalena-Cundinamarca. *Ingeniería*, *16*(2), 107-124. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/19759?show=full

Prada Forero, L. E., Sánchez Castro, Z., García Bernal, H. R., & Rojas Ávila, H. S. (2012). Hornillas paneleras Ward-Cimpa: validación de los modelos matemáticos de diseño Corpoica-UIS. *Fuentes, El Reventón Energético*, *10*(2). https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3337

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

Sánchez Castro, Z., García Bernal, H. R., & Mendieta Menjura, O. A. (2013). Efecto del precalentamiento del aire primario y la humedad del bagazo de caña de azúcar durante la combustión en lecho fijo. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *14*(1), 5-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol14_num1_art:263

Soler Villamizar, J. P., & Gómez Tovar, F. H. (2004). *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimpa y plana-Cimpa en hornillas paneleras* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. https://docplayer.es/33971712-

Determinacion-de-los-parametros-de-diseno-y-operacion-de-camaras-de-combustion-tipo-ward-cimpa-y-plana-cimpa-en-hornillas-paneleras.html

Tarazona Parra, G. A. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera: medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). https://www.ica.gov.co/getattachment/6a54658e-1723-488d-a7ab-2f4baad793cb/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-cana-panele.aspx

Velásquez, F., Espitia, J., Hernandez, H., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2021). Improving the thermal, productive, and environmental performance of a non-centrifugal cane sugar production module using a heat recovery system. *Journal of Food Engineering*, *308*, artículo 110688. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110688



Capítulo 12

Potencial terapéutico de derivados de caña de azúcar en la regeneración de la piel: cultivo 2D

Mónica Cuellar Entrena, Laura Rueda Gensini, Juan Carlos Cruz Jiménez, Carolina Muñoz Camargo y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

Actualmente existe un interés creciente por el azúcar no centrifugada de caña, debido a su alto valor nutricional, riqueza en moléculas funcionales y potencial medicinal. Este estudio se enfocó en estudiar el efecto de derivados de caña de azúcar, específicamente a partir de extractos de jugo, miel y panela, sobre procesos regenerativos en un modelo de herida 2D *in vitro*. Todos los extractos mostraron una baja citotoxicidad en células vero dentro de un amplio rango de concentraciones (8-250 µg/mL) y una alta hemocompatibilidad, demostradas por una baja actividad hemolítica y trombogénica. La presencia de extractos de jugo, miel y panela en un cultivo 2D de queratinocitos y fibroblastos humanos, previamente modificado para simular una herida, aumentó la migración celular de manera significativa al ser comparados con el control, en ausencia de dichos compuestos, lo que reduce el tiempo necesario para el cierre completo de la herida en casi un 50 %.

Palabras clave: panela, evaluación *in vitro*, citotoxicidad, actividad hemolítica y trombogénica

Introducción

El consumo de productos derivados de algunas plantas tropicales, como la caña de azúcar para la producción de panela (*Saccharum officinarum* L.), está fuertemente relacionado con beneficios para la salud, debido a su valor nutricional, riqueza de moléculas funcionales y potencial medicinal (Ames et al., 1993; Jaffé, 2015). Muchas plantas tropicales como esta se valoran por ser fuentes naturales de antioxidantes. Los antioxidantes son moléculas que controlan y reducen el daño oxidativo al retrasar o inhibir el proceso de oxidación generado por radicales libres, lo que mejora la vida útil de los productos y, simultáneamente, protege el sistema biológico de quien los consume (Duthie et al., 1996). En la última década, los compuestos fenólicos han ganado un considerable interés en el ámbito médico y científico debido a sus diferentes propiedades biológicas (Balasundram et al., 2006). Los compuestos antioxidantes, como el β-caroteno, el ácido ascórbico y los compuestos fenólicos, juegan un papel terapéutico y preventivo contra varias condiciones y enfermedades como el envejecimiento, la inflamación y ciertos tipos de cáncer (Heliövaara et al., 1994; Vivekananthan et al., 2003; Zidan & Azlan, 2022).

Por esto, el uso de plantas, productos y extractos derivados de estas ha sido una ruta para acelerar el proceso de cicatrización y regeneración de heridas (Reuter et al., 2010). En Colombia, por ejemplo, se usa como crema cicatrizante la ralladura de panela, pero esta práctica cultural se basa únicamente en la tradición y no cuenta con ningún tipo de evidencia científica sobre cuáles compuestos químicos tienen efecto cicatrizante o cuál es su mecanismo de acción. Sin embargo, la composición y las propiedades biológicas de interés de la caña de azúcar y sus derivados pueden verse afectadas por diferentes factores como la variedad (genotipo), el clima, los suelos, la nutrición del cultivo, el tiempo de cosecha, el almacenamiento y los procesos posteriores a la cosecha, corte, almacenamiento y procesamiento agroindustrial (Pérez-Gregorio et al., 2011; Rodrigues et al., 2009). Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial

terapéutico de tres extractos de derivados de caña de azúcar (jugo, miel y panela) producidos bajo condiciones controladas de temperatura, para preservar mejor su composición bioactiva. En particular, el potencial de estos derivados para promover procesos regenerativos en heridas de piel humana se evaluó mediante un modelo *in vitro* de herida 2D.

Metodología

En el estudio, los derivados de caña de azúcar empleados y la nomenclatura para la identificación de las muestras (entre paréntesis) fueron los siguientes: jugo crudo (J), jugo clarificado (JC), jarabe (miel) y panela (panela). Para evaluar el potencial regenerativo de los derivados de caña de azúcar, se caracterizaron diferentes propiedades biológicas determinantes en los procesos de regeneración de heridas. Primero, se evaluó la citocompatibilidad de los extractos metanólicos de los derivados de caña con el propósito de determinar el rango de concentración viable para su subsecuente uso en el modelo de herida 2D *in vitro*.

Preparación de muestras

Las muestras se prepararon a partir de 1.000 kg de caña de azúcar (variedad RD 7511): caña (18 °Bx), jugo (21 °Bx), miel (68 °Bx) y panela (93 °Bx), los cuales fueron producidos por AGROSAVIA empleando procesos de extracción, clarificación, evaporación y concentración bajo condiciones térmicas controladas. La extracción de compuestos fenólicos se realizó de acuerdo con el protocolo de Duarte-Almeida et al. (2011), con algunas modificaciones. Se realizó la extracción en triplicado a partir de las muestras de derivados de caña liofilizadas (~30 g), con metanol al 100 %, en una proporción de 1:1 p/v. Las muestras fueron filtradas bajo vacío con papel filtro (Whatman n.º 1). El exceso de solvente fue removido a 37 °C y 100 rpm en un rotoevaporador durante 30 min. Posteriormente, las muestras fueron suspendidas en 60 mL de metanol al 100 %.

Se prepararon *stocks* de 10 mg/mL en *buffer* de Hepes de 10 mM para cada uno de los derivados de caña y el solvente de extracción (metanol), con el propósito de estimar su impacto en los ensayos *in vitro*. Se realizó la caracterización biológica de los extractos para determinar el rango de concentración viable para su subsecuente uso en el modelo de herida 2D *in vitro*. En particular, se evaluaron características que presentan especial interés dentro del marco de regeneración de piel en un modelo de herida 2D, como la citotoxicidad, la hemocompatibilidad y la actividad antibacteriana. Todas las concentraciones de los extractos metanólicos se prepararon en *buffer* de Hepes de 10 mM, a menos que se indique lo contrario.

Citotoxicidad

Para evaluar la viabilidad celular de los diferentes extractos, se cultivaron células vero (ATCC CCL-81) en placas de 96 pozos a una densidad celular de 100.000 células por pozo. El cultivo fue expuesto durante 24 horas a 8 concentraciones diferentes de los derivados de caña (8-1.000 µg/mL), en condiciones controladas de temperatura a 37 °C y con una atmósfera del 5 % de CO_2. Una vez terminado el tiempo de incubación, se determinó la citotoxicidad *in vitro* mediante dos métodos: el ensayo del bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol (MTT), para determinar el efecto de los extractos sobre la actividad metabólica celular, y la prueba de lactato deshidrogenasa (LDH), para evaluar su efecto sobre la integridad de la membrana celular.

Para el primero, las células se expusieron a bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol (MTT) y se incubaron durante 2 horas, en la oscuridad, a 37 °C. Finalmente, se disolvieron los cristales de formazán formados al adicionar 100 µL de dimetilsulfóxido (DMSO) al 20 % (v/v). Se leyó la absorbancia a 595 nm en un espectrofotómetro (Ames et al., 1993). Se utilizó el 10 % (v/v) de DMSO en el medio Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM) como control positivo, y el medio DMEM como control negativo. La viabilidad celular de MTT (%) se calculó de acuerdo con la ecuación 1,

donde A_E es la absorbancia del medio con un extracto específico, A_{BE} es la absorbancia del blanco del extracto, A_{DMEM} es la absorbancia del control negativo y A_{BDMEM} es la absorbancia del blanco del control negativo.

$$\%\ de\ viabilidad\ de\ \mathrm{MTT} = \frac{A_E - A_{B_E}}{A_{DMEM} - A_{B_{DMEM}}} * 100 \qquad (1)$$

Para el ensayo LDH, se tomó una muestra de 50 µL del sobrenadante del cultivo previo a la exposición a MTT y se pasó a una microplaca nueva. Las muestras fueron expuestas al sustrato de la enzima LDH de acuerdo con las especificaciones del kit de LDH de Sigma-Aldrich, y se leyó la absorbancia de la muestra a 490 nm en un espectrofotómetro. Se utilizó el 10 % (v/v) de Triton X-100 en el medio DMEM como control positivo, y el medio DMEM como control negativo. La viabilidad celular de LDH (%) se calculó de acuerdo con la ecuación 2, donde A_{triton} es la absorbancia del control positivo, y $A_{Btriton}$ es la absorbancia del blanco del control positivo.

$$\%\ de\ viabilidad\ de\ \mathrm{LDH} = 1 - \frac{A_E - A_{B_E}}{A_{triton} - A_{B_{triton}}} * 100 \qquad (2)$$

Hemólisis

Se obtuvieron 5 mL de sangre de un donante humano sano en un tubo EDTA K2, para prevenir la coagulación de la muestra (Comité de ética de investigación acta N° 1095 del 2019). La muestra de sangre fue centrifugada a 1.800 rpm durante 5 min para separar los glóbulos rojos del plasma y los glóbulos blancos. Posteriormente, el plasma se removió de la muestra y se descartó. Las impurezas y trazas de plasma fueron removidas de los glóbulos rojos mediante tres lavados con centrifugación a 1.800 rpm por 5 min. Las células fueron lavadas con 150 mM de NaCl en una proporción de 1:1 (v/v). Los glóbulos rojos se expusieron a 8 concentraciones de extractos dentro del rango de 8-1.000 µg/mL

en *buffer* de Hepes de 10 mM durante 1 hora a 37 °C. Se utilizaron 1X y Triton X-100 al 10 % (v/v) como control negativo y positivo, respectivamente. Se tomaron 100 µL de sobrenadante de cada muestra y se leyó la absorbancia a 450 nm en un espectrofotómetro (Evans et al., 2013). La capacidad hemolítica se cuantificó en relación con el control negativo, de acuerdo con la ecuación 3, donde A_{PBS} y A_{BPBS} son las absorbancias del control negativo y del blanco del control negativo, respectivamente.

$$\% \, de \, hemólisis = \frac{A_E - A_{B_E}}{A_{PBS} - A_{B_{PBS}}} * 100 \qquad (3)$$

Agregación plaquetaria

Se obtuvo plasma rico en plaquetas de un donante humano sano en un tubo de citrato de sodio, para evitar la agregación de la muestra durante la donación. Para determinar si los extractos inducían agregación plaquetaria, el plasma rico en plaquetas fue subsecuentemente expuesto a 8 concentraciones de extractos dentro del rango de 8-1.000 µg/mL en *buffer* de Hepes de 10 mM. Se utilizaron tres controles para evaluar la agregación de las plaquetas: trombina (alta agregación), PBS (baja agregación) y plasma pobre en plaquetas (PPP; no agrega). Se cuantificó la agregación plaquetaria mediante absorbancia en relación con el control positivo, de acuerdo con la ecuación 4, donde A_{PPP} es la absorbancia del PPP, y A_{tromb} es la absorbancia de la trombina (Tsujino et al., 2019).

$$\% \, de \, agregación = \frac{A_E - A_{PPP}}{A_{tromb} - A_{PPP}} * 100 \qquad (4)$$

Actividad antibacteriana

Se realizó una prueba piloto de actividad antibacteriana según las directrices del Instituto de Estándares Clínicos y de Laboratorio

sobre el método de microdilución (Cockerill et al., 2011). Se preparó un inóculo de *Escherichia coli* estandarizado según densidad óptica a los 620 nm en un espectrofotómetro. Las bacterias fueron expuestas a dos concentraciones de cada extracto: alta (10 mg/mL) y baja (1 mg/mL), en medio Luria-Bertani (LB), por triplicado, en placas de 96 pozos. Con base en el ensayo de citotoxicidad (cinco concentraciones), se escogió la concentración más tóxica para las células (10 mg/mL) y una concentración intermedia-baja (1 mg/mL), con el fin de encontrar actividad antibacteriana en este rango y así identificar la acción potencial de algunos de los extractos de los derivados de caña de azúcar. Las bacterias se incubaron por 3 horas a 37 °C. Cumplido el tiempo de incubación, se reinició el crecimiento bacteriano con 100 µL de medio LB. Se utilizó *buffer* Hepes de 10 mM como control negativo y 1 mg/mL de ciprofloxacina (antibiótico) como control positivo. Las bacterias se incubaron una segunda vez durante 6 horas a 37 °C y se leyó la absorbancia con un espectrofotómetro a 620 nm. Se cuantificó la actividad antibacteriana en relación con el control negativo, de acuerdo con la ecuación 5, donde A_E es la absorbancia del extracto, A_{BE} es la absorbancia del blanco del extracto, A_C es la absorbancia del control negativo y A_{BC} es la absorbancia del blanco del control negativo.

$$\%\ de\ crecimiento = \frac{A_E - A_{B_E}}{A_{C^-} - A_{B_{C^-}}} * 100 \qquad (5)$$

Cultivo celular

Se cultivaron queratinocitos de piel humana (HaCaT donadas por el Laboratorio de Genética Humana de la Universidad de los Andes) y fibroblastos de prepucio humano (HFF-1 ATCC-SCRC-1041), de manera independiente, en frascos de 75 cm^3 (SPL Life Sciences). Las células fueron mantenidas con medio completo de DMEM suplementado con un 10 % de suero bovino fetal y un 1 % de penicilina/estreptomicina. Las células fueron desprendidas de las cajas con un 0,25 % de tripsina-EDTA. La densidad celular fue determinada

mediante el método de tinción con azul de tripán y conteo celular en cámara de Neubauer. Todos los cultivos se mantuvieron a 37 °C en una atmósfera del 5 % de CO_2 y un 95 % de humedad.

Ensayo de herida 2D

El ensayo de herida 2D se desarrolló de acuerdo con el protocolo descrito por Liang et al. (2007), con algunas modificaciones. Se sembraron 200.000 células por pozo en una microplaca de 24 pozos. Una vez que las células llegaron al 70-80 % de confluencia, se procedió a realizar la herida en el centro de la monocapa celular con la punta de una micropipeta de 100 µL. La formación de la herida fue guiada por un molde para evitar variabilidad en la generación de la herida en todos los pozos (Suarez-Arnedo et al., 2020).

Una vez realizada la herida, se removió el medio de cultivo y se lavó con 1X para eliminar las células muertas y las trazas de la herida. Finalmente, se expuso cada pozo por triplicado a un tratamiento (250 µg/mL de caña, 250 µg/mL de jugo, 250 µg/mL de miel, 250 µg/mL de panela, un 0,25 % v/v de metanol, o DMEM). Las concentraciones de los diferentes derivados de la caña de azúcar fueron determinadas teniendo en cuenta un ensayo de citotoxicidad previo en el que se evaluaron cinco concentraciones y se determinó que 250 µg/mL era la concentración a la que ninguno de los derivados (caña, jugo, miel, panela y panela comercial) presentaba toxicidad en las mismas células utilizadas en el modelo de herida. Cada línea celular (HaCaT y HFF) fue cultivada por un total de 24 horas y evaluada de manera independiente.

La migración celular fue documentada con un microscopio invertido mediante el uso de imágenes tomadas a diferentes tiempos: inmediatamente después (t0), 12 horas después (t12) y 24 horas después (t24) de hacer la herida. Las imágenes de cada pozo fueron tomadas dentro de un mismo campo de visión y analizadas con el *software* ImageJ. La distancia de la herida

(ancho) fue medida utilizando una herramienta desarrollada por el Grupo de Ingeniería Biomédica (GIB) de la Universidad de los Andes (Suarez-Arnedo et al., 2020). Todos los tratamientos y el control fueron realizados por triplicado, evaluando tres campos por cada pozo ($n = 9$). La tasa de migración celular (R_m) (ecuación 6) y el ancho de la herida fueron determinados utilizando la fórmula descrita por Grada et al. (2017), donde D_i es el ancho de la herida en el tiempo inicial, D_f es el ancho de la herida en el tiempo final y t es el tiempo transcurrido.

$$R_m = \frac{D_i - D_f}{t} \qquad (6)$$

Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado, y cada medida se realizó tres veces en cada réplica ($n = 9$). Los resultados se reportan como el promedio ± la desviación estándar. La diferencia entre medias se evaluó mediante un análisis de varianza unifactorial (ANOVA). Los resultados obtenidos para los diferentes tratamientos fueron comparados con respecto al control mediante t-test, utilizando GraphPad Prism 8. Se consideraron diferencias significativas entre medidas de los grupos experimentales si $p < 0{,}05$ y $p < 0{,}0001$ al ser comparados con el grupo de control.

Resultados y discusión

Propiedades biológicas de los extractos derivados de caña panelera

La actividad metabólica de las muestras se evaluó por medio de un ensayo de MTT, y la integridad de la pared celular fue determinada mediante un ensayo de LDH. Los resultados de ambos ensayos demostraron que el rango de concentración de los extractos en el cual se mantiene la viabilidad celular es bastante amplio (figura 12.1).

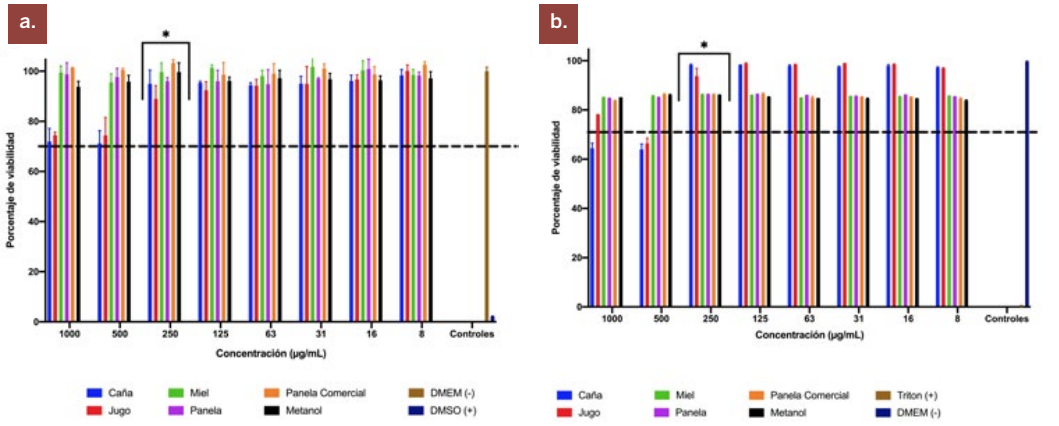


Figura 12.1. Citotoxicidad de los extractos de los derivados de caña de azúcar. a. Ensayo de MTT; b. Ensayo de LDH.

Nota: a. La viabilidad fue determinada como porcentaje de la absorbancia (595 nm) de MTT, detectado con respecto al control negativo (100 % de viabilidad) promedio ± la desviación estándar. b. La viabilidad fue determinada como porcentaje de 1 – la absorbancia (490 nm) de LDH, detectado con respecto al control negativo (100 % de toxicidad) promedio ± la desviación estándar. La línea de corte corresponde al 70 % de viabilidad

* ($p < 0{,}0001$).

Fuente: Elaboración propia

La caña y el jugo fueron los únicos extractos que presentaron una reducción significativa en la viabilidad celular para las concentraciones más altas evaluadas (1 mg/mL y 500 µg/mL). Como se observa en la figura 12.1, todas las concentraciones de miel y panela presentan una viabilidad superior al 70 % (el mínimo permitido por la norma ISO 10993-5:2009). Además, con el propósito de evidenciar el posible efecto adverso de trazas de metanol en las muestras, se utilizaron 8 concentraciones de metanol en DMEM, como control del contenido de solvente en cada dilución, donde el máximo es el 0,25 % v/v, y se realizaron diluciones de 1:2 hasta el 0,00195 % v/v. Los resultados presentados en la figura 12.1 evidencian que la máxima concentración posible en las diluciones de extractos no presenta ningún efecto adverso ni reduce la respuesta generada por cada concentración evaluada. De acuerdo con estos resultados, se propone utilizar concentraciones de los extractos iguales o menores a 250 µg/mL para estudios subsecuentes.

Como el contacto con la sangre es inevitable en cualquier tratamiento sobre una herida, se evaluaron los efectos de los extractos sobre dos componentes principales de la sangre: el plasma (plaquetas) y los eritrocitos. Los resultados evidenciados en la figura 12.2 demuestran que ninguno de los extractos de caña evaluados presenta características incompatibles con la sangre.

En la figura 12.2a se observa que los extractos derivados de caña de azúcar para panela evaluados no inducen más de un 3 % de destrucción de los glóbulos rojos (hemólisis). Adicionalmente, en la figura 12.2b es evidente que ninguno de los extractos derivados de caña de azúcar para panela presenta una agregación plaquetaria superior al 10 %. Dicha agregación no es significativa en relación con el control positivo de trombina. Estos resultados sugieren que la exposición de una herida a estos extractos derivados de caña de azúcar no traerá efectos adversos relacionados a toxicidad sanguínea o trombogénesis.

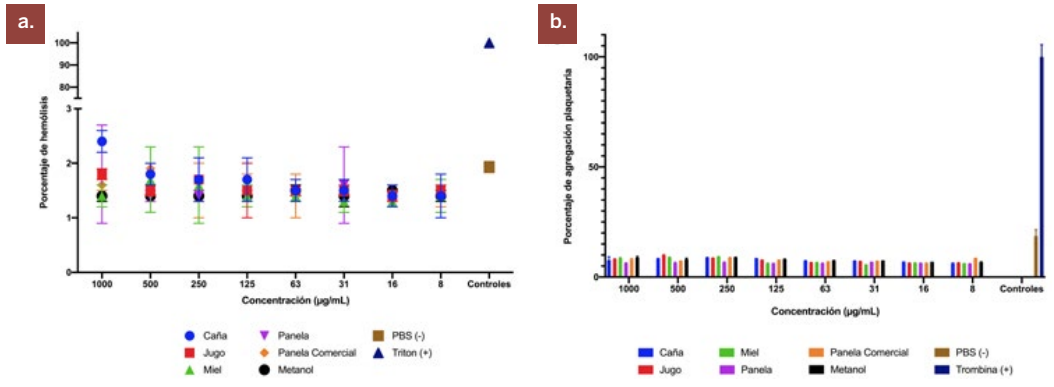


Figura 12.2. Hemocompatibilidad de los extractos de los derivados de caña de azúcar. a. Ensayo de hemólisis; b. Ensayo de agregación plaquetaria.

Nota: a. Exposición de eritrocitos ($4{,}68 \times 10^6$ glóbulos rojos/L) a 8 concentraciones de los extractos de caña. Se evalúa lisis celular mediante absorbancia (595 nm) de las muestras en relación con el control positivo (Triton X-100 al 10 %). El control positivo fue tomado como el 100 % de lisis. b. Porcentaje de agregación plaquetaria relativo al control positivo de trombina, donde se determina el efecto de la trombina como el 100 % de la capacidad de agregación de plaquetas. Todos los resultados se presentan como el promedio ± la desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para determinar el efecto que podrían tener los extractos sobre el control de infecciones en heridas, se evaluó su capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano. Sin embargo, de acuerdo con los resultados resumidos en la figura 12.3, los extractos no presentan actividad antibacteriana de manera significativa al ser comparados con el control, ya que no hubo una inhibición significativa en el crecimiento bacteriano.

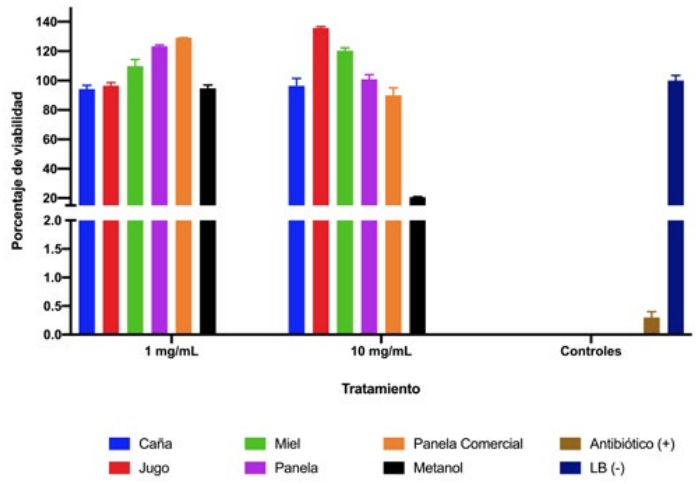


Figura 12.3. Actividad antibacteriana de los extractos de los derivados de caña de azúcar.

Nota: La viabilidad bacteriana fue evidenciada en términos de la inhibición en el crecimiento, la cual fue determinada mediante la absorbancia de la muestra (620 nm), donde mayor absorbancia corresponde a mayor crecimiento bacteriano y, como consecuencia, a mayor viabilidad.

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de herida 2D

Los resultados de migración celular para el cierre de herida se determinaron de manera cuantitativa, de acuerdo con el protocolo descrito previamente e ilustrado en la figura 12.4a. En la figura 12.4b se observa el cambio en el ancho de la herida en el tiempo tras su exposición a los diferentes tratamientos de los productos derivados de la caña de azúcar. Todos los extractos presentaron diferencias significativas al ser comparados con el control (medio de cultivo DMEM).

Se evidenció que la tasa de migración celular (R_m) aumentó en un 35, 46 y 43 % para los extractos de jugo, miel y panela, respectivamente, en comparación con la tasa de migración del control.

Estos resultados indican que los extractos retienen compuestos con un alto potencial regenerativo. Debido a que no se evidenciaron diferencias significativas entre los efectos generados por estos tres derivados de caña de azúcar para producción de panela, se plantea la hipótesis de que la/s molécula/s responsable/s de dicho efecto no varía/n significativamente durante la concentración a lo largo de la cadena de producción de los derivados de caña panelera evaluados. Sin embargo, el extracto de caña es el único que presentó el efecto contrario al esperado. La tasa de migración celular para este extracto es un 38 % menor a la evidenciada con el control. Lo anterior indica que existe algún compuesto o conjunto de compuestos presentes en el bagazo de la caña de azúcar que reduce de manera significativa la migración celular *in vitro*. Se plantea la hipótesis de que dicho/s compuesto/s está/n presente/s en el bagazo debido a que este es removido en la etapa de producción de jugo de caña.

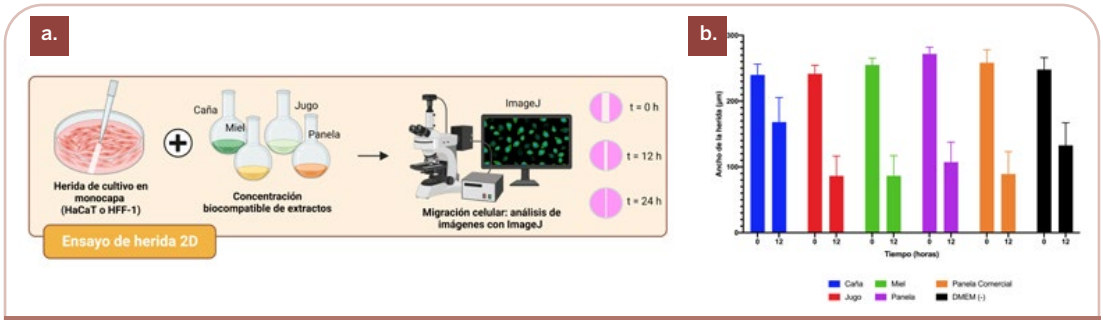


Figura 12.4. Evaluación de cierre de la herida. a. Esquema del ensayo de herida 2D *in vitro*; b. Cierre de la herida en el tiempo.

Nota: El ancho de la herida disminuye en el tiempo de manera significativa para todos los grupos evaluados. El ancho de la herida se midió por triplicado en tres campos de visión para cada grupo evaluado ($n = 9$) en el tiempo. Los datos se presentan como el ancho promedio de la herida ± la desviación estándar. No existen diferencias significativas entre el jugo, la miel y la panela comercial. Todas las heridas se encuentran un 100 % cerradas después de 24 horas, excepto con el jugo crudo sin limpieza previa, que se mantiene en aproximadamente un 30 % (resultados no mostrados).

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Los extractos aislados a partir de derivados de caña de azúcar mediante el método de extracción con metanol pueden ser empleados en ensayos *in vitro* en un amplio rango de concentraciones, que van desde 8 hasta 250 µg/mL. Esto se evidenció a través de ensayos de biocompatibilidad celular que demostraron que concentraciones iguales o inferiores a 250 µg/mL no presentan citotoxicidad. Adicionalmente, ninguna de las concentraciones evaluadas tiene la capacidad de inducir hemólisis o agregación plaquetaria de manera significativa, lo cual asegura que los extractos no inducirán efectos adversos relacionados con su contacto con sangre en el microambiente de la herida. Por otro lado, los extractos metanólicos evaluados no presentan un potencial efecto antibacteriano en los rangos de concentración evaluados, por lo que se descarta que su efecto regenerativo se deba al control de infecciones. A pesar de esto, los extractos metanólicos de derivados de caña panelera favorecen la migración celular en heridas 2D modeladas por el cultivo en monocapa de queratinocitos (HaCaT) y fibroblastos humanos (HFF-1). El jugo, la miel y la panela aumentan la migración celular de manera significativa al ser comparados con el control, por lo que reducen el tiempo necesario para el cierre completo de la herida en casi un 50 %. De manera global, se evidencia el gran potencial terapéutico y regenerativo de los extractos metanólicos aislados a partir de los derivados de caña para producción de panela.

Agradecimientos

Agradecemos a AGROSAVIA por el apoyo financiero y al equipo de investigación del proyecto “Desarrollo de procesos industriales que permitan obtener productos de valor agregado derivados de caña de azúcar para la producción de panela” por el desarrollo del estudio.

Referencias

Ames, B. N., Shigenaga, M. K., & Hagen, T. M. (1993). Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *90*(17), 7.915-7.922. https://doi.org/10.1073%2Fpnas.90.17.7915

Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, *99*(1), 191-203. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042

Cockerill, F. R., Wikler, M. A., Alder, J., Dudley, M. N., Eliopoulos, G. M., Ferraro, M. J., & Zimmer, B. L. (2011). *Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically; approved standard*. Clinical and Laboratory Standards Institute.

Duarte-Almeida, J. M., Salatino, A., Genovese, M. I., & Lajolo, F. M. (2011). Phenolic composition and antioxidant activity of culms and sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) products. *Food Chemistry*, *125*(2), 660-664. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.059

Duthie, S. J., Ma, A., Ross, M. A., & Collins, A. R. (1996). Antioxidant supplementation decreases oxidative DNA damage in human lymphocytes. *Cancer Research*, *56*(6), 1.291-1.295. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8640816/

Evans, B. C., Nelson, C. E., Yu, S. S., Beavers, K. R., Kim, A. J., Li, H., Nelson, H. M., Giorgio, T. D., & Duvall, C. L. (2013). Ex vivo red blood cell hemolysis assay for the evaluation of pH-responsive endosomolytic agents for cytosolic delivery of biomacromolecular drugs. *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*, (73), artículo e50166. https://doi.org/10.3791/50166

Grada, A., Otero-Vinas, M., Prieto-Castrillo, F., Obagi, Z., & Falanga, V. (2017). Research techniques made simple: Analysis of collective cell migration using the wound healing assay. *Journal of Investigative Dermatology*, *137*(2), e11-e16. https://doi.org/10.1016/j.jid.2016.11.020

Heliövaara, M., Knekt, P., Aho, K., Aaran, R. K., Alfthan, G., & Aromaa, A. (1994). Serum antioxidants and risk of rheumatoid arthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, *53*(1), 51-53. https://doi.org/10.1136/ard.53.1.51

Jaffé, W. R. (2015). Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature.

Journal of Food Composition and Analysis, *43*, 194-202. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.06.007

Liang, C.-C., Park, A. Y., & Guan, J.-L. (2007). *In vitro* scratch assay: A convenient and inexpensive method for analysis of cell migration *in vitro*. *Nature Protocols*, *2*(2), 329-333. https://doi.org/10.1038/nprot.2007.30

Pérez-Gregorio, M. R., Regueiro, J., González-Barreiro, C., Rial-Otero, R., & Simal-Gándara, J. (2011). Changes in antioxidant flavonoids during freeze-drying of red onions and subsequent storage. *Food Control*, *22*(7), 1.108-1.113. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.006

Reuter, J., Merfort, I., & Schempp, C. M. (2010). Botanicals in dermatology: An evidence-based review. *American Journal of Clinical Dermatology*, *11*(4), 247-267. https://doi.org/10.2165/11533220-000000000-00000

Rodrigues, A. S., Pérez-Gregorio, M. R., García-Falcón, M. S., & Simal-Gándara, J. (2009). Effect of curing and cooking on flavonols and anthocyanins in traditional varieties of onion bulbs. *Food Research International*, *42*(9), 1.331-1.336. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.005

Suarez-Arnedo, A., Torres Figueroa, F., Clavijo, C., Arbeláez, P., Cruz, J. C., & Muñoz-Camargo, C. (2020). An image J plugin for the high throughput image analysis of *in vitro* scratch wound healing assays. *PLOS ONE*, *15*(7), artículo e0232565. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232565

Tsujino, T., Isobe, K., Kawabata, H., Aizawa, H., Yamaguchi, S., Kitamura, Y., Masuki, H., Watanabe, T., Okudera, H., Nakata, K., & Kawase, T. (2019). Spectrophotometric determination of the aggregation activity of platelets in platelet-rich plasma for better quality control. *Dentistry Journal*, *7*(2), artículo 61. https://doi.org/10.3390%2Fdj7020061

Vivekananthan, D. P., Penn, M. S., Sapp, S. K., Hsu, A., & Topol, E. J. (2003). Use of antioxidant vitamins for the prevention of cardiovascular disease: Meta-analysis of randomised trials. *The Lancet*, *361*(9.374), 2.017-2.023. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(03)13637-9

Zidan, D., & Azlan, A. (2022). Non-centrifugal sugar (NCS) and health: A review on functional components and health benefits. *Applied Sciences*, *12*(1), artículo 460. https://doi.org/10.3390/app12010460

Capítulo 13

Revisión del aprovechamiento de los residuos generados en la agroindustria panelera vía digestión anaeróbica

Oscar Andrés Mendieta Menjura, Diego Hernando Flórez Martínez, Eduar Yovany Antolinez Sandoval, Liliana del Pilar Castro Molano y Humberto Escalante Hernández

Resumen

La digestión anaeróbica (DA) es reconocida mundialmente como una tecnología promisoria para la gestión y valorización de residuos orgánicos, ya que cumple con los requisitos de una alternativa sostenible para la producción de biogás (bioenergía) y digerido (biofertilizante). Recientemente, se han realizado investigaciones para el tratamiento de residuos de caña de azúcar mediante dicha tecnología, lo cual podría generar beneficios económicos, sociales y ambientales para la agroindustria panelera. El objetivo de este capítulo fue revisar los avances en DA afines a las unidades productoras de panela, así como los desafíos y las pautas para promover la futura integración de esta tecnología. Como resultado, se encontró que las líneas de investigación en las cuales se deberían concentrar los esfuerzos son el diseño y la puesta en marcha de biorrefinerías, la continuidad en las pruebas a escala de laboratorio (como el potencial de biometanización) y la incorporación de metodologías de análisis (como la evaluación del ciclo de vida). Aunque la DA es una alternativa sostenible para el tratamiento de los residuos orgánicos, la tecnología aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo para la agroindustria panelera, por lo que es necesario adelantar investigación básica y aplicada.

Palabras clave: sostenibilidad, biotecnología, biomasa, economía circular, biodigestores

Introducción

La producción mundial de alimentos crece a medida que aumenta la población mundial. Al satisfacerse la demanda de alimentos, simultáneamente se eleva la generación de residuos orgánicos (agrícolas, agroindustriales, urbanos, etc.), lo cual requiere una gestión adecuada para evitar posibles cargas ambientales. Por otro lado, también crece la demanda energética, y con ella la necesidad urgente de impulsar alternativas sostenibles.

Recientemente, se han investigado varias rutas para la valorización de la biomasa residual, entre las cuales se destaca la digestión anaeróbica (DA), ya que permite procesar un amplio espectro de sustratos (materia orgánica biológica obtenida de plantas o animales) con un bajo requerimiento energético (Yellezuome et al., 2022). Entre las fuentes de biomasa se incluyen el estiércol animal, los desechos de alimentos y los residuos de cultivos agrícolas. La DA se define como un proceso de degradación microbiológica en un ambiente sin oxígeno que permite la recuperación de energía por medio de la producción de biogás (mezcla gaseosa compuesta principalmente por CH_4 y CO_2) y un biofertilizante rico en minerales llamado "digerido" (materia orgánica estabilizada) (Pereda Reyes et al., 2015). El proceso consta de cuatro etapas consecutivas y cooperativas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El éxito del proceso de la DA depende de varios parámetros fisicoquímicos, como el pH, la temperatura ambiente, el tipo de sustrato, la relación carbono/nitrógeno (C:N), el tiempo de retención de sólidos, la carga orgánica, los nutrientes disponibles y los compuestos inhibidores (Mao et al., 2015).

El biogás producido mediante DA se puede utilizar como fuente de energía renovable para producir calor o electricidad, con lo que se reduce la dependencia de otras fuentes de energía (leña o combustibles fósiles). Mientras tanto, el digerido corresponde a la fracción no degradada durante el proceso de DA. Esta tecnología reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que

conduce a una forma de energía sostenible y a un medio ambiente más limpio (Maile et al., 2016).

La integración de esta tecnología en la agroindustria panelera podría ofrecer oportunidades interesantes para contribuir a la bioeconomía circular. El procesamiento anaeróbico de desechos agroindustriales también puede agregar un valor significativo, ya que la gestión de estos desechos representa un costo importante para las agroindustrias (Koul et al., 2021). Los residuos provenientes de la caña de azúcar para la producción de panela son fuentes disponibles que podrían ser aprovechadas para obtener biogás.

El objetivo del presente estudio de revisión fue hacer una retrospectiva de trabajos anteriores, tendencias y enfoques modernos, para facilitar el desarrollo de futuros proyectos en DA para la agroindustria panelera y contribuir, consecuentemente, con información vital para la dirección de una alternativa sostenible. Este trabajo es de gran importancia, ya que brinda oportunidades para investigaciones nuevas en el campo de la bioenergía. Las pequeñas y medianas unidades productoras de panela, así como los actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, serían los beneficiarios de este trabajo. Actualmente, en el mundo se están realizando cada día más investigaciones en el amplio espectro de la DA, lo que sugiere que su adopción como una tecnología de energía renovable está aumentando, lo cual podría contribuir a la bioeconomía circular y a la mitigación del cambio climático.

Metodología

El análisis de la tecnología de DA para los residuos orgánicos de la agroindustria panelera se basó en la literatura publicada revisada por pares (artículos científicos). Se incluyeron experiencias internacionales alineadas con el estudio, como el manejo de residuos de caña de azúcar provenientes de las industrias azucarera y del etanol, que podrían ser potencialmente introducidos en

la agroindustria panelera. Para ello, se utilizó la base de datos bibliográfica de Scopus; las palabras utilizadas en la ecuación de búsqueda fueron las siguientes: "sugarcane", "Saccharum officinarum", "non-centrifuga cane sugar", "panela", "jaggery", "sugarcane waste", "anaerobic digestion" y "pretreatment".

La revisión contempló estudios a escala de laboratorio que revelaron el potencial de biometanización (Holliger et al., 2016) de los sustratos y sus respectivos pretratamientos. Por otro lado, se establecieron y clasificaron las líneas de investigación clave en DA para la agroindustria panelera en los siguientes temas: 1) temas motor, basados en corrientes principales de alto desarrollo y relevancia; 2) temas básicos y transversales, que actualmente están generando tendencia, interés y soporte; 3) temas emergentes y declinantes, que pueden cobrar relevancia e interés o que están siendo desestimados en su continuidad como línea de investigación, y 4) temas de nicho, asociados a investigaciones básicas o que han sido ampliamente trabajados pero aún no cobran la relevancia para convertirse en temas motor. Finalmente, se postularon futuras investigaciones (retos y oportunidades) relacionadas con la introducción de la tecnología de DA en la agroindustria panelera.

Resultados y discusión

Inicialmente, se presenta la revisión de los principales residuos generados en la agroindustria panelera que han sido gestionados a través de DA en monodigestión. Luego, se revelan estudios enfocados en codigestión anaeróbica, es decir, el tratamiento simultáneo de varios residuos de caña de azúcar. Posteriormente, se establecen y clasifican las líneas de investigación para la tecnología de DA en la agroindustria panelera, y se postulan desafíos y pautas para su implementación a gran escala.

Residuos agrícolas de cosecha

En la agroindustria panelera se generan diversos residuos orgánicos, tanto en el cultivo como en el proceso de transformación.

En la zona de corte de los tallos, cuando la caña alcanza su estado de madurez, se producen los residuos agrícolas de cosecha (RAC), comprendidos por hojas verdes y secas, cogollos y cañas no recuperables. Los RAC constituyen un recurso natural abundante, económico y renovable, y en ellos se almacena alrededor de un tercio de la energía primaria total de la caña de azúcar (Leal et al., 2013).

Los RAC muestran una resistencia a ser hidrolizados, debido a su naturaleza lignocelulósica, hidrofóbica y recalcitrante (Janke et al., 2016). Por tanto, el acceso de los microorganismos y enzimas durante el proceso de DA es limitado. Para contrarrestar estos efectos inhibitorios, se han utilizado diferentes tipos de pretratamientos (por ejemplo, el físico, el químico, el biológico, etc.), como opciones para mejorar el proceso de DA, al aumentar el área de superficie accesible y modificar la estructura cristalina o de la lignina (Hendriks & Zeeman, 2009). En la literatura se reportan los siguientes pretratamientos para los RAC: el tratamiento físico, mediante la reducción del tamaño de partícula (Mendieta et al., 2020b); el ácido (Sindhu et al., 2011); el alcalino (Janke et al., 2017; Sindhu et al., 2014); el ácido con surfactante (Sindhu et al., 2012); el biológico (Kumari & Das, 2016); el ultrasónico asistido por surfactante (Sindhu et al., 2013), y los tratamientos secuenciales (Raghavi et al., 2016). Aunque se cuenta con un amplio abanico de posibilidades de pretratamiento para los RAC, es necesario identificar una alternativa técnica y económicamente viable para la agroindustria panelera. Una opción atractiva es la reducción del tamaño de partícula.

Los RAC presentan un potencial de biometanización (PBM) de 0,261 Nm^3 de CH_4/kg de sólidos volátiles (SV), al reducir su tamaño de partícula a 2 mm, y son un sustrato de capacidad amortiguadora y de biodegradabilidad adecuadas para el proceso de DA (Mendieta et al., 2020b).

Cachaza

El proceso de producción de panela involucra una etapa de clarificación del jugo, en la cual se obtiene un residuo agroindustrial

llamado "cachaza": un líquido coloidal de color oscuro. En algunas unidades productoras de panela se utiliza la cachaza como un subproducto para la alimentación animal. Sin embargo, en otras unidades de producción no se cuenta con buenas prácticas de manejo, por lo cual este residuo se convierte en un riesgo ambiental para las fuentes hídricas y el suelo. Las características de la cachaza, como su alta humedad y su elevada concentración de materia orgánica, pueden contribuir al proceso de DA.

En la literatura se informa que la cachaza tiene un PBM de 0,227 Nm^3 de CH_4/kg de SV empleando un pretratamiento de dilución al 12,5 % v/v (Mendieta et al., 2020c). Este pretratamiento se empleó debido a que la cachaza presentó una naturaleza ácida. Otra alternativa por explorar consiste en regular el pH de la cachaza a través de un pretratamiento alcalino o su combinación con otro sustrato que permita regular la acidez, como el estiércol bovino.

La cachaza es un residuo característico de la agroindustria panelera y poco ha sido explorado su uso en la tecnología de DA. No obstante, su alto contenido de azúcares rápidamente degradables (García et al., 2007) y su baja concentración de fibra la convierten en un sustrato atractivo para el proceso de DA.

Bagazo

En la agroindustria panelera se generan otros residuos orgánicos. Durante la molienda de la caña de azúcar se obtiene bagazo al extraer el jugo. Este se utiliza principalmente para producir energía térmica para el proceso. Sin embargo, por lo general, los hornos tradicionales presentan bajas eficiencias, de alrededor del 29 % (Sardeshpande et al., 2010). Además, la escasez de bagazo es muy común en estos hornos debido a la baja eficiencia en la utilización del calor (Anwar, 2010). Por tanto, el bagazo obtenido en la molienda es gastado completamente para la generación de energía térmica.

No obstante, dependiendo de la tecnología utilizada en el horno de producción de panela (Rodríguez et al., 2018), es posible que

se generen excedentes de bagazo y que el residuo se encuentre disponible para la generación de biogás. En este caso, el PBM del bagazo oscila alrededor de 0,187 Nm^3 de CH_4/kg de SV, al reducir el tamaño de partícula a 2 mm (Paulose & Kaparaju, 2021). El bagazo, al ser pretratado hidrotérmicamente a 180 °C y un 8,5 % de $Ca(OH)_2$, alcanza un PBM de 0,23 Nm^3 de CH_4/kg de SV (Mustafa et al., 2018).

Codigestión anaeróbica

En las unidades productoras de panela se dispone de varios residuos orgánicos, y una opción de gestión y valorización de estos es el tratamiento simultáneo de las biomasas por codigestión anaeróbica (CoDA). La CoDA de varios sustratos puede aumentar la producción de biogás en comparación con los sustratos individuales (Kangle et al., 2012); sin embargo, tiene la desventaja de que en gran medida aún se desconoce la proporción exacta de mezcla de los sustratos para lograr un proceso óptimo, ya que depende del tipo de biomasa y de las condiciones reales de operación disponibles (Adekunle & Okolie, 2015).

En industrias como la del azúcar y el bioetanol a partir de caña de azúcar, se generan residuos como el bagazo, la vinaza y la torta de filtración. Estos residuos presentan una elevada concentración de materia orgánica, representada por un contenido de sólidos volátiles superior al 70 %, y un PBM entre 0,199 y 0,341 Nm^3 de CH_4/kg de SV (Janke et al., 2015). Por otro lado, el rendimiento de la producción de biogás de dichos residuos se ha mejorado a través de la CoDA. López González et al. (2017) investigaron la CoDA de mezclas compuestas de vinaza y torta de filtración en diferentes proporciones de mezcla: 0:1, 1:0, 1:3, 3:1 y 1:1. Así, se demostró que la CoDA de estos sustratos aumenta el PBM hasta 0,246 Nm^3 de CH_4/kg de demanda química de oxígeno (DQO), un 13 % más que la torta de filtración individualmente. Talha et al. (2016) determinaron que la CoDA de la torta de filtración con bagazo produce más metano que la monodigestión de la torta de filtración. Incluso, la composición del digerido de la CoDA presentó

un mejor equilibrio de nutrientes (relación C:N: 24,70) cuando la relación entre la torta de filtración y el bagazo fue de 1:3, en comparación con la torta de filtración como sustrato único (relación C:N: 9,68). Cárdenas-Cleves et al. (2018) realizaron la CoDA de la torta de filtración con residuos de alimentos (4:1), y obtuvieron incrementos en el rendimiento de metano del 12 y el 22 % en comparación con las monodigestiones, respectivamente.

Al combinar la cachaza generada en la agroindustria panelera con los RAC en una proporción de 25:75, se obtuvo un PBM de 0,276 Nm^3 de CH_4/kg de SV (Mendieta et al., 2020b). Por tanto, se observa un efecto sinérgico para la mezcla, es decir, un rendimiento acumulado de metano superior a las monodigestiones de ambos sustratos (30,2 % para la cachaza y 5,9 % para los RAC). Esto demuestra que la CoDA de los RAC y la cachaza es una opción eficiente para la producción de biogás.

Por otro lado, en la agroindustria panelera se generan aguas residuales durante el lavado de equipos y utensilios. Al utilizar dichas aguas para la dilución de los sustratos (RAC y cachaza), se obtuvo una producción de biogás de 0,132 m^3/kg de SV en un biodigestor tubular a escala de banco (Mendieta et al., 2020a).

Clasificación de las líneas de investigación

En la figura 13.1 se muestra el mapa temático conceptual de las líneas de investigación clave en DA para la agroindustria panelera. La clasificación se basó en las variables de centralidad y densidad: nivel de relevancia y nivel de desarrollo del tema de investigación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

1. Temas motor (cuadrante superior derecho): se destacan el diseño y la puesta en marcha de biorrefinerías, la recuperación de bioenergía derivada de residuos, la mejora del rendimiento de metano y la cogeneración de energía.
2. Temas básicos (cuadrante inferior derecho): potencial de biometanización (a escala de laboratorio), procesos de codigestión,

DA de residuos lignocelulósicos y variables como el tiempo de retención hidráulica y la calidad del metano.

3. Temas emergentes y declinantes (cuadrante inferior izquierdo): en este caso, los temas que cobran interés son los pretratamientos, el manejo de vinazas, el biogás como energía renovable, el aprovechamiento de las hojas de caña para la producción de bio-carbón y la CoDA.

4. Temas de nicho (cuadrante superior izquierdo): se destacan los procesos de codigestión de residuos agroindustriales, la incorporación de sistemas de producción en las tendencias de la bioeconomía, el análisis metagenómico para la evaluación del potencial de uso de los residuos y el análisis de la transformación de residuos en bioenergía.

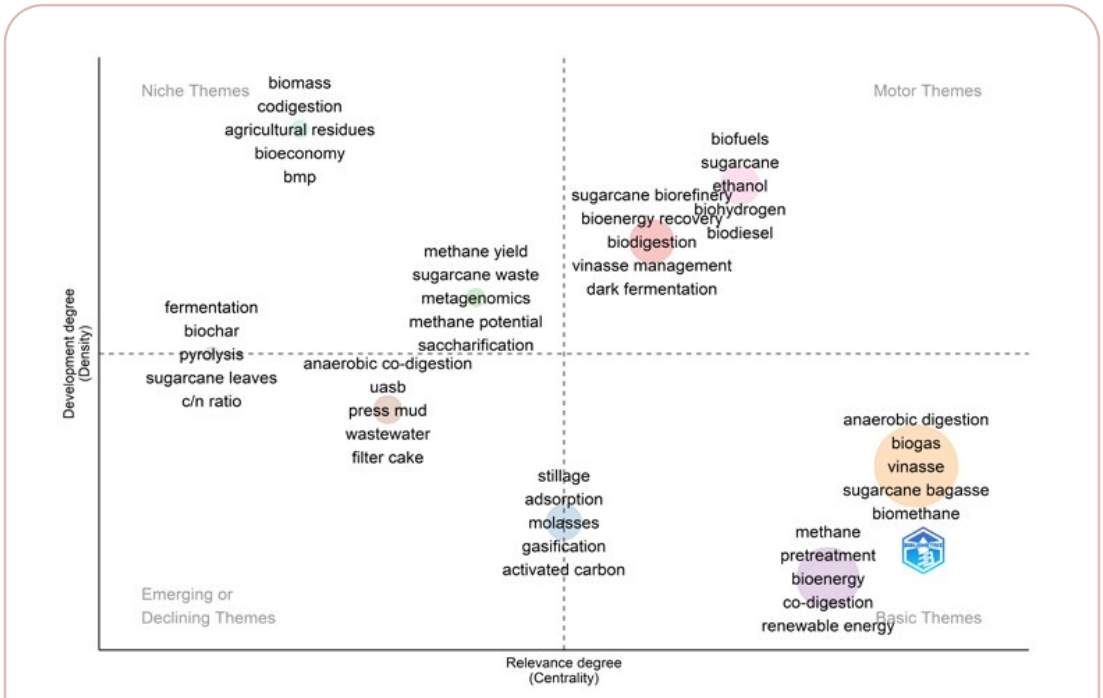


Figura 13.1. Mapa temático conceptual de la DA en la agroindustria de la panela.

Fuente: Elaboración propia con base en datos recuperados de Scopus

Desafíos y pautas

Aunque la DA parece ser una tecnología adecuada y prometedora para la agroindustria panelera, existen algunos obstáculos que dificultan su implementación a gran escala y que son temas para futuras investigaciones. A continuación, se detallan algunas barreras y se proyectan directrices para promover la integración de esta tecnología:

- Enfoques empíricos de la tecnología de DA: la investigación en este campo es reciente para la agroindustria panelera, por lo que aún falta comprender a profundidad los aspectos fundamentales para la gestión de sus residuos mediante dicha tecnología. Existen algunas iniciativas actuales que provienen de otras industrias (azucarera y de bioetanol) y que se han extrapolado a la producción de panela. Sin embargo, esta transferencia podría conducir a percepciones erradas de la tecnología por parte de los productores de panela si no encuentran los resultados esperados, y, en consecuencia, se podría afectar su adopción. Por tanto, es necesario abrir la "caja negra" referente a la disponibilidad y utilización de los sustratos y consorcios microbianos, los mecanismos y la cinética de formación de los productos y los fenómenos de transferencia de masa e hidrodinámica que ocurren en los reactores.
- Escala de laboratorio: la mayoría de los estudios reportados en la literatura son imprescindiblemente a escala de laboratorio. Sin embargo, se requiere investigación aplicada a gran escala, que conduzca a recomendaciones directas para los usuarios. Dado que a partir de la caña de azúcar se generan diversos residuos, y en el mismo sistema de producción de panela es posible obtener otros tipos de residuos orgánicos (como estiércol animal, aguas residuales, desechos de alimentos, residuos de poda, entre otros), es importante realizar más investigación en codigestión a partir de los diversos tipos de sustrato para la optimización en la producción de biogás de calidad (con un contenido elevado de metano) y un digerido rico en nutrientes. La CoDA necesita una gestión minuciosa, ya que los parámetros y ajustes operativos

establecidos habitualmente no son prácticos ni generales para todos los residuos orgánicos biodegradables.

- Uso de los productos: las investigaciones publicadas recientemente indican que la DA tiene el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales, al producir energía mediante la sustitución de combustibles fósiles o leña por biometano (Moraes et al., 2017). Además, el digerido presenta una baja carga de patógenos y contiene nutrientes que están fácilmente disponibles para ser absorbidos por los cultivos en forma de nitratos, fosfatos y otros compuestos orgánicos (Auer et al., 2017); el uso de digerido como fertilizante puede reducir las emisiones de N_2O al reemplazar alternativas inorgánicas cuya producción requiere grandes cantidades de energía (Zhu et al., 2019). Por tanto, es necesario identificar las características de los productos obtenidos vía DA y las opciones de aplicación en el mismo sistema productivo, para contribuir a la bioeconomía circular de la agroindustria panelera.
- Modelos productivos: la integración de la tecnología de DA en la agroindustria panelera depende de varios factores, entre ellos la materia prima, la configuración del digestor para la obtención del biogás y el digerido, y sus posibles usos. La idoneidad de la materia prima para el proceso de DA se rige por la disponibilidad, el costo, los requisitos de pretratamiento/suplementación, los rendimientos de calidad del biogás y el digerido, y los beneficios ambientales, económicos y sociales. Además, existen otros factores logísticos que deben ser considerados, como la recolección, transporte y almacenamiento de los sustratos. Aún queda mucho por investigar y desarrollar con respecto al modelado matemático y la aplicación de herramientas de predicción y optimización de la tecnología de DA; estas herramientas deben incluir desde la consecución de la materia prima hasta la distribución y aplicación de los productos. Los modelos desarrollados a la fecha no tienen en cuenta la variación geográfica (ambiental) y estacional (temporal) de los sustratos, lo cual representa una oportunidad para investigar en esta dirección. Es necesario

explorar en profundidad la hibridación del biogás con fuentes de energía convencionales y no convencionales. El modelado y las simulaciones se pueden acoplar a la optimización de diferentes objetivos específicos, como maximizar la producción de biogás y minimizar tanto el costo de energía como los perjuicios ambientales, entre muchos otros.

Conclusiones

En este estudio se revisó el estado del arte y se analizaron las perspectivas futuras en el campo de la DA para la gestión y valorización de los residuos agroindustriales del proceso de producción de panela. A pesar de que la DA es una alternativa sostenible para el tratamiento anaeróbico de los residuos orgánicos, la tecnología aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo y se necesita mucha más investigación básica y aplicada. Algunos obstáculos y cuellos de botella fueron identificados y deben ser superados para fomentar la adopción de la DA por parte de los productores de panela, como realizar estudios a gran escala en biodigestores, definir la estrategia para el uso del biogás y el biofertilizante, y desarrollar un modelo productivo que integre dicha tecnología de gestión de residuos. En consecuencia, para lograr una aplicación práctica y amplia del proceso de DA en la agroindustria panelera, es necesario contar con incentivos combinados por parte de las agencias gubernamentales y ambientales, así como con el apoyo de la comunidad científica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) (Convocatoria 757 de 2016), así como a AGROSAVIA y a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el desarrollo de este estudio.

Referencias

Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, *6*(3), 205-212. http://dx.doi.org/10.4236/abb.2015.63020

Anwar, S. I. (2010). Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans. *Energy Conversion and Management*, *51*(2), 360-364. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.033

Auer, A., Vande Burgt, N. H., Abram, F., Barry, G., Fenton, O., Markey, B. K., Nolan, S., Richards, K., Bolton, D., De Waal, T., Gordon, S. V., O'Flaherty, V., Whyte, P., & Zintl, A. (2017). Agricultural anaerobic digestion power plants in Ireland and Germany: Policy and practice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *97*(3), 719-723. https://doi.org/10.1002/jsfa.8005

Cárdenas-Cleves, L. M., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2018). Anaerobic codigestion of sugarcane press mud with food waste: Effects on hydrolysis stage, methane yield, and synergistic effects. *International Journal of Chemical Engineering*, *2018*, artículo 9351848. https://doi.org/10.1155/2018/9351848

García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano Latorre, A., Santana, N. J., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/13454

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, *100*(1), 10-18. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027

Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*, *74*(11), 2.515-2.522. https://doi.org/10.2166/wst.2016.336

Janke, L., Leite, A., Batista, K., Weinrich, S., Sträuber, H., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W. (2016). Optimization of hydrolysis and volatile fatty acids production from sugarcane filter cake: Effects of urea supplementation and sodium hydroxide pretreatment.

Bioresource Technology, *199*, 235-244. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.117

Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas production from sugarcane waste: Assessment on kinetic challenges for process designing. *International Journal of Molecular Sciences*, *16*(9), 20.685-20.703. https://doi.org/10.3390/ijms160920685

Janke, L., Weinrich, S., Leite, A., Terzariol, F. K., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W. (2017). Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. *Energy Conversion and Management*, *141*, 378-389. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.083

Kangle, K. M., Kore, S. V., Kore, V. S., & Kulkarni, G. S. (2012). Recent trends in anaerobic codigestion: A review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, *2*(4), 210-219. https://www.researchgate.net/publication/236002577_Recent_Trends_in_Anaerobic_Codigestion_A_Review

Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2021). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, *206*, artículo 112285. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285

Kumari, S., & Das, D. (2016). Biologically pretreated sugarcane top as a potential raw material for the enhancement of gaseous energy recovery by two stage biohythane process. *Bioresource Technology*, *218*, 1.090-1.097. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.070

Leal, M. R. L. V., Galdos, M. V., Scarpare, F. V., Seabra, J. E. A., Walter, A., & Oliveira, C. O. F. (2013). Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, *53*, 11-19. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007

López González, L. M., Pereda Reyes, I., & Romero Romero, O. (2017). Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, *68*, 139-145. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.016

Maile, I., Muzenda, E., & Mbohwa, C. (2016, 26-28 de octubre). *Optimization of biogas production through anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: A review* [presentación en conferencia]. The 7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry, San Francisco, Estados Unidos.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 540-555. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032

Mendieta, O., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020a). Management and valorization of waste from a non-centrifugal cane sugar mill via anaerobic co-digestion: Technical and economic potential. *Bioresource Technology*, *316*, artículo 123962. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123962

Mendieta, O., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020b). Synergistic effect of sugarcane scum as an accelerant co-substrate on anaerobic co-digestion with agricultural crop residues from non-centrifugal cane sugar agribusiness sector. *Bioresource Technology*, *303*, artículo 122957. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122957

Mendieta, O., Madrigal, G., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020c). Sugarcane scum as a novel substrate for rapid biogas production from the non-centrifugal cane sugar agribusiness sector in developing countries. *Bioresource Technology*, *297*, artículo 122364. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122364

Moraes, B. S., Petersen, S. O., Zaiat, M., Sommer, S. G., & Triolo, J. M. (2017). Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Applied Energy*, *189*, 21-30. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.009

Mustafa, A. M., Li, H., Radwan, A. A., Sheng, K., & Chen, X. (2018). Effect of hydrothermal and $Ca(OH)_2$ pretreatments on anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production. *Bioresource Technology*, *259*, 54-60. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.028

Paulose, P., & Kaparaju, P. (2021). Anaerobic mono-digestion of sugarcane trash and bagasse with and without pretreatment. *Industrial Crops and Products*, *170*, artículo 113712. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113712

Pereda Reyes, I., Pagés Díaz, J., & Sárvári Horváth, I. (2015). Anaerobic biodegradation of solid substrates from agroindustrial activities — Slaughterhouse wastes and agrowastes. En R. Chamy, & F. Rosenkranz (Eds.), *Biodegradation and bioremediation of polluted systems: New advances and technologies*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/60907

Raghavi, S., Sindhu, R., Binod, P., Gnansounou, E., & Pandey, A. (2016). Development of a novel sequential pretreatment strategy for the production of bioethanol from sugarcane trash. *Bioresource Technology*, *199*, 202-210. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.062

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

Sardeshpande, V. R., Shendage, D. J., & Pillai, I. R. (2010). Thermal performance evaluation of a four pan jaggery processing furnace for improvement in energy utilization. *Energy*, *35*(2), 4.740-4.747. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.018

Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Janu, K. U., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2011). Dilute acid pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane tops for bioethanol production. *Bioresource Technology*, *102*(23), 10.915-10.921. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.066

Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Preeti, V. E., Sandhya, S. V., Vani, S., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2012). Surfactant-assisted acid pretreatment of sugarcane tops for bioethanol production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *167*(6), 1.513-1.526. https://doi.org/10.1007/s12010-012-9557-3

Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2014). Physicochemical characterization of alkali pretreated sugarcane tops and optimization of enzymatic saccharification using response surface methodology. *Renewable Energy*, *62*, 362-368. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.041

Sindhu, R., Kuttiraja, M., Preeti, V. E., Vani, S., Sukumaran, R. K., & Binod, P. (2013). A novel surfactant-assisted ultrasound pretreatment of sugarcane tops for improved enzymatic release of sugars. *Bioresource Technology*, *135*, 67-72. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.050

Talha, Z., Ding, W., Mehryar, E., Hassan, M., & Bi, J. (2016). Alkaline pretreatment of sugarcane bagasse and filter mud codigested to improve biomethane production. *BioMed Research International*, *2016*, artículo 8650597. https://doi.org/10.1155/2016/8650597

Yellezuome, D., Zhu, X., Wang, Z., & Liu, R. (2022). Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: A review. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, *157*, artículo 112043. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112043

Zhu, T., Curtis, J., & Clancy, M. (2019). Promoting agricultural biogas and biomethane production: Lessons from cross-country studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114*, artículo 109332. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109332





Componente III

Importancia socioeconómica y ambiental de la agroindustria panelera



Capítulo 14

Costos y beneficios económicos de la agroindustria panelera en Colombia

Gonzalo Alfredo Rodríguez-Borray, Sonia Mercedes Polo-Murcia, Bellanid Huertas-Carranza, Jose Luis Tauta-Muñoz y Ginna Natalia Cruz-Castiblanco

Resumen

En este capítulo se presenta el análisis económico de veintiún sistemas productivos regionales de panela en Colombia. Se utilizó el método de agrupamiento *k-means* para encontrar un patrón de costos de producción en función de la tecnología utilizada, y se analizó la serie de tiempo de los precios de la panela pagados al productor entre 1999 y 2020. La investigación se realizó utilizando datos primarios recopilados por AGROSAVIA mediante talleres de consenso y entrevistas a agricultores locales, y con información provista por Fedepanela. Los resultados muestran que los costos de producción por unidad de producto varían inversamente proporcional al nivel de adopción tecnológica; esto es, a mayor adopción de tecnologías de cultivo y procesamiento, menores son los costos unitarios de producción de la caña y la panela, lo cual brinda ventajas competitivas a los productores. En Colombia, los productores de panela ajustan las cantidades ofertadas en función de los precios observados en el mismo periodo de tiempo (t) en el cual ocurre la variación del precio, es decir, responden inmediatamente al cambio de precios.

Palabras clave: cambio tecnológico, clúster, precios al productor, rentabilidad

Introducción

La producción de panela en Colombia se desarrolla en diversos contextos biofísicos, económicos y culturales, con reportes oficiales de producción en 553 municipios del país (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021). Se estima que alrededor de esta agroindustria se generan 236.000 empleos en 20.000 plantas de procesamiento (Alarcón et al., 2020).

AGROSAVIA tiene una amplia trayectoria en programas de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología para el subsector panelero. En las tres últimas décadas (1990-2020), se ha consolidado un conocimiento de las dinámicas productivas de esta cadena de valor y se han realizado algunos análisis para comparar la rentabilidad económica de los sistemas regionales de producción de panela a nivel local. Sin embargo, no se dispone de un estudio integral a nivel nacional que compare los rendimientos económicos de esta agroindustria en función de la tecnología local utilizada. Al encontrar este vacío en la literatura, resulta interesante realizar un metaanálisis de la estructura económica de las prácticas de cultivo de caña de azúcar y procesamiento para la producción de panela a nivel regional en Colombia.

Este capítulo tiene como objetivo comparar los rendimientos económicos de la producción de panela en doce departamentos de Colombia y relacionarlos con el comportamiento histórico de las series de precios al productor de panela. El área geográfica considerada en este estudio incluye los departamentos donde se concentra el 92 % de la producción nacional de panela (MADR, 2021): Antioquia, Boyacá, Caquetá, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Huila, Nariño, Santander, Norte de Santander, Risaralda y Tolima. Por lo anterior, un análisis integral puede ayudar a respaldar intervenciones de políticas y programas de asesoramiento más sólidos para aumentar la adopción de tecnologías y, en consecuencia, mejorar las condiciones de vida de los agricultores y las familias que derivan su sustento principal del ejercicio de esta actividad agroindustrial.

Metodología

Este documento corresponde a un análisis de carácter inferencial, pues recoge sistemáticamente información muestral de variables económicas de las unidades productivas de panela. A partir de esta información, se sintetizan y extrapolan a la población las características de los clústeres de unidades productivas identificadas mediante el procedimiento de *k-means*. En este procedimiento, se genera una partición de las unidades observadas (*n*) en *k* clústeres, donde cada uno está representado por el promedio de los elementos que lo componen, y la sumatoria de las distancias al cuadrado de los puntos al promedio del clúster es mínima.

Costos de producción

Se analizaron veintiún estructuras de costos de producción de panela (tabla 14.1), de las cuales, según la disponibilidad y calidad de la información, el 24 % correspondió al departamento de Nariño, el 14 % al departamento de Antioquia, el 14 % a Cundinamarca, el 10 % a Boyacá y el 5 % a los departamentos de Caldas, Caquetá, Cauca, Huila, Norte de Santander, Risaralda, Santander y Tolima, cada uno. Las estructuras de costos de producción utilizadas en este estudio fueron tomadas de dos fuentes de información: la primera correspondió a los resultados de talleres de estructuración de costos de producción por consenso realizados por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, 2018); en estos talleres participó un grupo homogéneo de productores que, basados en su propia experiencia y trayectoria en el sistema productivo, discutieron y llegaron, mediante consenso, a un acuerdo sobre la estructura de costos de producción de panela en su área de influencia. La segunda fuente de información correspondió a estructuras de costos elaboradas por Fedepanela con base en entrevistas realizadas a productores representativos. Si bien las metodologías de recolección son diferentes, dado que la primera corresponde a consensos entre productores de una misma tipología y la segunda a entrevistas individuales a productores, el concepto de costo, la división de fases del cultivo, apronte y procesamiento de la caña, así como el cálculo de los

costos directos e indirectos, siguen una lógica de estimación similar, lo cual las hace comparables. Cada estructura de costos fue sometida a un proceso de control de calidad, y, para efectos comparativos, todos los valores monetarios fueron llevados a valor constante, para lo cual se tomó el año 2018 como base.

En términos de la estructura, los costos se dividieron en cuatro fases, según el ciclo productivo de la panela: 1) costos de establecimiento del cultivo, 2) costos de sostenimiento del cultivo, 3) costos de cosecha y 4) costos de elaboración de la panela. Respecto a los costos de establecimiento del cultivo, se debe anotar que en varias regiones paneleras la caña de azúcar para panela tiene un carácter de cultivo permanente y no es frecuente que se hagan nuevas siembras cada vez que se realiza un corte o cosecha.

Los costos de establecimiento del cultivo de caña de azúcar fueron calculados como la suma de los insumos químicos y orgánicos, los servicios y la mano de obra requerida para la adecuación y preparación del suelo, la aplicación de correctivos de acidez (si esta se realiza), la siembra, la fertilización y el control de pérdidas de cultivo (insecticidas, fungicidas, herbicidas, control biológico, etc.), dividida entre el número de cortes o cosechas por realizar antes de hacer un nuevo establecimiento (ecuación 14.1).

$$C_{EC} = \frac{\sum MO_n + I_n + S_n}{NC} \qquad (14.1)$$

Donde:

C_{EC}: costo de establecimiento del cultivo

MO_n: costo de la mano de obra en el concepto n

n: adecuación y preparación del suelo, siembra, fertilización y control de pérdidas de cultivo

I_n: costo de los insumos químicos/orgánicos en el concepto n

S_n: costo de los servicios en el concepto n

NC: número de cortes

Tabla 14.1. Estructuras de costos de producción de panela analizadas por departamento, metodología de captura de información y fuente

Departamento	Municipios	Metodología de captura de costos de producción	Fuente	Año
Antioquia	Guadalupe	TC	Fedepanela	2020
	Nariño	TC	AGROSAVIA	2018
	Frontino	TC	AGROSAVIA	2018
Boyacá	San José de Pare	EP	Fedepanela	2020
	Santana	TC	AGROSAVIA	2018
Caldas	Supía	TC	AGROSAVIA	2018
Caquetá	San José del Fragua	TC	AGROSAVIA	2018
Cauca	Cajibío	EP	Fedepanela	2020
Cundinamarca	Nocaima	TC	AGROSAVIA	2018
	Caparrapí	TC	AGROSAVIA	2018
	Útica	TC	AGROSAVIA	2018
Huila	San Agustín	EP	Fedepanela	2020
Nariño	Sandoná	TC	AGROSAVIA	2018
	Ricaurte	TC	AGROSAVIA	2018
	Ancuya	TC	AGROSAVIA	2018
	Linares	TC	AGROSAVIA	2018
	Consacá	TC	AGROSAVIA	2018
Norte de Santander	Convención	EP	Fedepanela	2020
Risaralda	Quinchía	TC	AGROSAVIA	2018
Santander	Güepsa	TC	AGROSAVIA	2018
Tolima	Alvarado	EP	Fedepanela	2020

TC: taller de costos de producción (por consenso)

EP: entrevista individual a productor representativo

Fuente: Elaboración propia

Los costos de sostenimiento del cultivo corresponden a todas aquellas labores, servicios e insumos utilizados para mantener el cultivo de la caña entre un corte y otro. Los conceptos de los costos de sostenimiento dependen del tipo de corte que se le realice a la caña: corte por parejo (cosecha completa del lote) o corte por entresaque (se seleccionan para la cosecha solo los tallos maduros presentes en el lote). La madurez de la caña de azúcar se mide mediante un refractómetro que muestra los grados Brix. Los grados Brix indican el porcentaje de los sólidos solubles totales contenidos en el jugo de la caña, y deben estar entre 18 y 22 °Bx, rango en el cual la caña está lista para la cosecha (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2017), por lo que se dejan en pie aquellos tallos que aún no tienen el grado de madurez adecuado. Los costos de sostenimiento se calcularon de acuerdo con la ecuación 14.2.

$$C_S = \sum MO_j + I_j + S_j \qquad (14.2)$$

Donde:

C_S: costo de sostenimiento

MO_j: costo de la mano de obra en el concepto j

j: cepillado o encalle si es corte por parejo, resiembra, fertilización, control de pérdidas de cultivo y deshoje

I_j: costo de los insumos químicos/orgánicos en el concepto j

S_j: costo de los servicios en el concepto j

Cuando se trata de cortes por parejo, generalmente se tienen conceptos de costo como las labores de cepillado de los tocones de la caña, el encalle de la hojarasca que queda luego de la cosecha, la resiembra de esquejes o plántulas para cubrir áreas vacías del lote, los aporques, la aplicación de fertilizantes químicos o abonos orgánicos, el control manual o químico de malezas, el control del

barrenador del tallo y otros insectos-plaga y el deshoje, entre otras labores.

En el caso de cosechas por entresaque, el manejo suele ser mucho más sencillo y puede incluir resiembras para repoblamiento de tallos, aplicación de abonos (generalmente orgánicos), aporques y control de malezas (generalmente manual). En muchas ocasiones, el sostenimiento de los cultivos manejados por entresaque es tan simple como entrar a cortar la caña dos o tres veces al año y, en ese momento, eliminar manualmente, con machete o azadón, algunas de las malezas presentes en el lote. Los costos asociados a la fase de cultivo correspondieron a la suma de los costos de establecimiento y los costos de sostenimiento.

En la fase de apronte, se consideraron los conceptos de cosecha o corte de la caña, transporte de la caña desde el lote hasta la planta de procesamiento y almacenamiento de la caña en la planta de procesamiento (ecuación 14.3).

$$C_{AC} = \sum MO_t + I_t + S_t \qquad (14.3)$$

Donde:

C_{AC}: costo de apronte de caña

MO_t: costo de la mano de obra en el concepto t

t: cosecha, transporte y almacenamiento

I_t: costo de los insumos químicos/orgánicos en el concepto t

S_t: costo de los servicios en el concepto t

En la fase de costos de procesamiento, se consideraron los costos de insumos, servicios y labores para la producción esperada de panela (ecuación 14.4).

$$C_P = \sum MO_l + I_l + S_l \qquad (14.4)$$

Donde:

C_P: costo de procesamiento

MO_l: costo de la mano de obra en el concepto l

l: extracción de jugo, operación en la hornilla y el tren de pailas (intercambiadores de calor), moldeo y empaque

I_l: costo de los insumos químicos/orgánicos en el concepto l

S_l: costo de los servicios en el concepto l

Se consideraron unos costos indirectos, C_I, calculados a partir de la estimación de los valores de administración, depreciación de equipos e intereses de capital, propios o pagados. Dado el carácter semipermanente o permanente del cultivo de la caña de azúcar para panela, no se acostumbra arrendar los lotes, por lo que no se consideraron los costos de renta de la tierra.

El costo total de producción por unidad de producto, C_T, se calculó como la suma de los costos de establecimiento, sostenimiento, alce y transporte, procesamiento y los costos indirectos, C_I, dividida por la producción total (ecuación 14.5).

$$C_T = \frac{C_{EC} + C_S + C_{AC} + C_P + C_I}{Producción\ total\ (kg)} \qquad (14.5)$$

La información se compiló en un archivo de Excel, y los costos se clasificaron según el rubro productivo, el tipo de entrada (insumo, servicio, mano de obra) y el valor de los costos reportados llevados a valor constante del año 2018. Con la información validada y organizada, se llevaron a cabo las estimaciones del costo por unidad de producto y la distribución porcentual del costo por cada una de las cuatro fases del ciclo productivo definidas previamente. Para encontrar un patrón de costos de producción en función de la tecnología utilizada, las estructuras de costos fueron clasificadas según criterios de proximidad mediante el algoritmo *k-means*.

Análisis de precios

La información sobre los precios de la panela pagados al productor fue tomada del Sistema de Información Panelera (SIPA) (Fedepanela, 2021), que registra semanalmente los precios promedio que se pagan al productor por kilogramo de panela en bloque.

Se utilizaron las series monetarias, a nivel mensual, entre enero de 1999 y diciembre de 2020, en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Santander y Tolima. Como la valoración monetaria de los precios pagados al productor originalmente se encuentra a precios corrientes de cada periodo, para efectos comparativos, los precios se llevaron a valor constante, tomando el año 2018 como base. Se calculó el precio promedio nacional ponderado por la participación en la producción de cada departamento, y el análisis de las fluctuaciones características de la serie de precios se enfocó principalmente en los componentes cíclico y estacional.

Indicadores de rentabilidad

Con base en la estimación del costo total de producción y la información de los precios promedio, máximo y mínimo de venta de la panela a nivel de productor en los diferentes departamentos, correspondientes al periodo 2014-2020, a pesos constantes de 2018, se calcularon los indicadores de beneficio económico de la producción de panela: utilidad por unidad de producto y rentabilidad al productor, expresada como la relación beneficio-costo.

La utilidad por unidad de producto se calculó como la diferencia entre el precio de venta de la panela a nivel de productor y el costo total de producción de la panela (ecuación 14.6).

$$U_{pp} = P_v - C_T \qquad (14.6)$$

Donde:

U_{pp}: utilidad por unidad de producto (COP/kg)

P_v: precio de la panela pagado al productor (COP/kg)

C_T: costo total de producción de la panela (COP/kg)

La rentabilidad al productor se estimó en este estudio como la relación entre la utilidad y el costo total de producción (ecuación 14.7).

$$R_p = \frac{U_{pp}}{C_T} \qquad (14.7)$$

Donde:

R_p: rentabilidad al productor (%)

Resultados y discusión

Costos de producción

En la figura 14.1 se presenta el resultado de la agrupación de las regiones paneleras según tres clústeres que presentan diferentes patrones de distribución porcentual de la participación de los costos de producción en las fases de establecimiento del cultivo, sostenimiento del cultivo, apronte de la caña y procesamiento de la caña. El costo de producción promedio de un kilogramo de panela en el clúster 1 es de COP 1.808; en el clúster 2 es de COP 1.774, y en el clúster 3 es de COP 1.665.

En el clúster 1, los costos de establecimiento y sostenimiento del cultivo tienen baja participación dentro del costo total, con valores inferiores al 13 %, en tanto que los costos de apronte y procesamiento de la caña son los que contribuyen en mayor proporción al costo total, con valores superiores al 87 %. Este grupo de regiones productoras de panela presenta los patrones de producción más tradicionales y la más baja adopción de cambios tecnológicos. Como resultado de esto, allí se presentan los menores niveles de productividad de panela por hectárea y los mayores costos totales de producción por kilogramo de panela.

El clúster 2 agrupa regiones paneleras con bajos costos de establecimiento del cultivo, bajos costos de sostenimiento del cultivo,

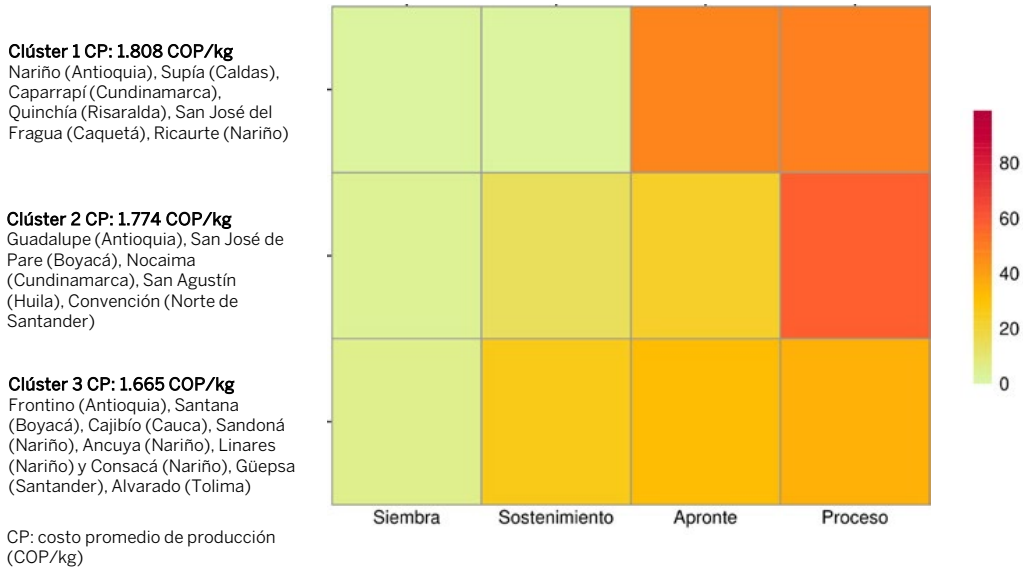


Figura 14.1. Agrupación *k-means* de la distribución porcentual de los costos de producción de panela.

Fuente: Elaboración propia

niveles medios en el costo de apronte y una mayor participación de los costos de procesamiento de la caña. Este clúster se caracteriza por el predominio de unidades productivas que cortan la caña por entresaque; tienen pocas labores en la fase de sostenimiento del cultivo; manejan un transporte tradicional de la caña, en mulas o caballos, y utilizan hornillas tradicionales para la elaboración de la panela. En este caso, se presentan niveles intermedios de productividad por hectárea y de costo por kilogramo de producto.

Por último, el clúster 3 está conformado por regiones paneleras en las que los costos de establecimiento y sostenimiento del cultivo tienen una mayor participación, casi equivalente a la

que tienen los costos de apronte y procesamiento de la caña. Este clúster presenta los mayores niveles de productividad por unidad de área y los menores costos de producción unitarios. En este grupo, las unidades productivas de panela se caracterizan por el predominio de cultivos manejados con cortes por parejo, con renovación periódica; la preparación manual o mecanizada de los suelos; la introducción de nuevas variedades de caña, y la adopción de prácticas agronómicas como la fertilización química y orgánica, el control manual y químico de malezas y, en algunas ocasiones, el control biológico del barrenador del tallo. El transporte de la caña para el apronte suele realizarse mediante animales, pero también puede combinarse con el uso de vehículos motorizados. En el procesamiento, se presenta una mayor adopción de tecnologías, como la utilización de motores eléctricos, hornillas mejoradas energéticamente, prelimpiadores y trapiches o enramadas con pisos en cemento y aislamiento de las áreas de procesamiento.

En la tabla 14.2 se presenta la estructura de costos de producción de panela representativa de cada clúster; se muestra la participación de los rubros de mano de obra, transporte, insumos y servicios que se emplean en las diferentes fases de producción. El clúster 1 se caracteriza porque la participación de la mano de obra es la más alta (78,97 %), en comparación con los clústeres 2 y 3 (54,81 % y 50,40 %, respectivamente).

Tabla 14.2. Estructura de costos para la producción de un kilogramo de panela según la tecnología

Rubros		Tecnología		
		Baja Clúster 1 (%)	Media Clúster 2 (%)	Alta Clúster 3 (%)
Mano de obra	Cultivo	0	8,75	21,95
	Apronte	52,36	24,5	25,66
	Procesamiento	26,61	30,32	24,66

Continúa

Continuación tabla 14.2

Rubros		Tecnología		
		Baja Clúster 1 (%)	Media Clúster 2 (%)	Alta Clúster 3 (%)
Transporte	Insumos	0	0	0,33
	Caña	4,81	5,83	2,79
	Panela	7,91	2,33	1,7
Insumos	Cultivo	0	0	5,63
	Procesamiento	8,31	18,17	0,98
Servicios	Cultivo	0	0	0,61
	Procesamiento	0	10,1	15,69
Total		100	100	100

Fuente: Elaboración propia

Análisis de precios

Se analizó la serie histórica de precios mensuales de panela desde enero de 1999 hasta diciembre de 2020. La cantidad de datos analizados fue de 264. El precio mínimo fue de COP 993 por kilogramo de panela (COP/kg), correspondiente al mes de agosto de 2004, y el precio más alto registrado fue de 3.567 COP/kg, en el mes de enero de 2017. El precio promedio registrado a lo largo del periodo de análisis corresponde a 1.795 COP/kg. El valor medio de la muestra ordenada fue de 1.678 COP/kg, que corresponde al punto central de los 264 datos ingresados. Debido a los distintos precios que se tienen en cuenta, y por la cantidad de años, la varianza muestra un valor alto (271,867), y la desviación estándar fue de 522 COP/kg; en consecuencia, se evidencia una gran variabilidad de los precios en el periodo analizado.

Los ciclos de precios en el mercado de panela a nivel nacional se presentan cada cinco años (Rodríguez Borray et al., 2020). La duración de un ciclo en la fluctuación del precio va de un máximo a un mínimo, o bien de un mínimo a un máximo. Con base en esto, en el periodo de 1999 a 2020 se evidenciaron seis ciclos en los

cuales los auges de precios fueron cada vez más altos y las caídas de los precios fueron cercanas al valor promedio de la serie. La duración del periodo de recesión y depresión del precio es mayor que la duración del periodo de picos en los precios.

En un mercado, las cantidades ofertadas y demandadas en cada periodo (mes o semana) con frecuencia no coinciden y se van ajustando con el tiempo, lo que genera variaciones en los precios. Las fluctuaciones de los precios en los diferentes meses del año se pueden medir y analizar mediante el cálculo de índices de estacionalidad (IE). El IE de los precios es un patrón de comportamiento que se repite regularmente y que se completa una vez cada doce meses (Tomek & Kaiser, 2014).

En general, la variación mensual de precios al productor de panela se encuentra en la banda de ±10 % a lo largo de los meses del año. El IE a nivel nacional registró su mayor valor en noviembre, diciembre y enero; en estos meses el valor del índice fue del 106,19 %, el 102,48 % y el 104,11 %, respectivamente (tabla 14.3). El IE mínimo se presentó en marzo, agosto y septiembre, con valores del 95,2 %, el 97,62 % y el 97,77 %, respectivamente; es probable que estos meses coincidan con los registros más altos en los inventarios de panela, lo cual incrementa la disponibilidad del producto en el mercado y provoca, así, excesos de oferta temporales que disminuyen los precios del edulcorante.

En los meses en los cuales el IE es inferior al 100 %, se evidencian caídas en el precio histórico para ese periodo; en este sentido, se puede trabajar en el diseño de programas de ordenamiento de mercados en los cuales, a través del manejo temporal de las ventas, se pueden enfrentar los excesos de oferta temporales y la caída de los precios.

Tabla 14.3. IE del precio de la panela en Colombia: análisis mensual del periodo 1999-2020

Departamento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Antioquia	105,99	98,74	92,24	95,64	98,22	95,78	96,35	97,18	99,3	103,83	109,4	107,33
Boyacá	103,06	96,39	90,91	95,3	96,62	97,53	100,75	99,76	100,13	103,92	111,01	104,62
Caldas	100,3	97,81	95,22	100,15	103,53	98,36	98,08	96,38	98,87	103,56	106,71	101,04
Caquetá	96,61	95,72	97,68	98,05	102,41	104,45	101,71	102,27	102,6	98,67	99,75	100,08
Cauca	101,2	97,56	98,63	102,54	100,16	102,11	93,34	97,52	100,23	92,67	108,23	100,04
Cundinamarca	108,62	105,44	101,11	103,77	100	96,2	97,94	94,8	92,45	93,99	103,98	101,7
Huila	106,70	96,5	94,6	101,1	99,6	101,5	104,5	98,6	97,6	99	100,6	99,7
Nariño	102,54	100,61	98,03	103,25	103,61	101,51	100,94	94,37	94,84	95,84	103,11	101,34
Norte de Santander	99,58	105,47	107,2	105,48	106,96	94,54	92,11	98,87	94,18	93,99	101,57	100,06
Risaralda	103,03	99,48	96,63	98,97	100,17	98,6	98,29	97,54	98,74	100,35	103,89	104,32
Santander	104,24	96,51	91,16	95,11	95,3	97,15	102,06	101,1	100,74	103,82	110,17	102,62
Tolima	104,34	102,61	101,39	106,54	103,45	98,39	96,69	96,38	95,82	96,61	99,32	98,45
Nacional	104,11	99,51	95,2	99,48	99,38	98,1	99,73	97,62	97,77	100,41	106,19	102,48

Fuente: Elaboración propia con base en información de Fedepanela

La figura 14.2 muestra la relación o sensibilidad de la oferta de la panela en Colombia ante los cambios en su precio en el mercado nacional. Por lo general, la relación entre el precio y la oferta es positiva. Este mismo comportamiento se replica a lo largo del periodo analizado, pues se manifestaron aumentos importantes en el precio en periodos en los que se presentaron reducciones importantes de la oferta de panela en el país, por ejemplo, en los años 2016 y 2017. También se observa que el mínimo histórico de precios en el periodo de estudio coincide con la sobreoferta de panela en el mercado nacional del periodo 2003-2004.

Se estimó la respuesta de la oferta de la panela ante cambios en los precios (Ramírez Gómez et al., 2004); sin embargo, el ajuste del modelo no fue aceptable y no se obtuvieron resultados estadísticamente significativos que permitieran explicar el efecto de los precios sobre la producción y superficie cosechada. En el largo plazo, la oferta de panela en el país parece no estar influenciada fuertemente por las variaciones en los precios del mercado. En Colombia, los productores de panela ajustan las cantidades producidas en función de los precios observados en el mismo periodo de tiempo, es decir, responden de forma rápida al cambio de los precios.

Indicadores de rentabilidad

En la figura 14.3 se presentan los resultados de la rentabilidad obtenida en las regiones paneleras del clúster 1, las cuales fueron ubicadas sobre el mapa de Colombia con sus respectivas regiones naturales. La utilidad promedio en el clúster 1 fue de 366,5 COP/kg, y la rentabilidad fue del 20,3 %. Las mayores utilidades se obtuvieron en los municipios de Supía (Caldas) y Quinchía (Risaralda), donde se registraron los mayores precios de venta de la panela a nivel nacional y bajos costos unitarios de producción.

En la figura 14.4 se presenta la distribución de los municipios paneleros representativos del clúster 2. Para este grupo de municipios, la utilidad promedio fue de 277,9 COP/kg de panela, y la tasa de rentabilidad fue del 15,7 %. En el clúster 2, los mayores niveles

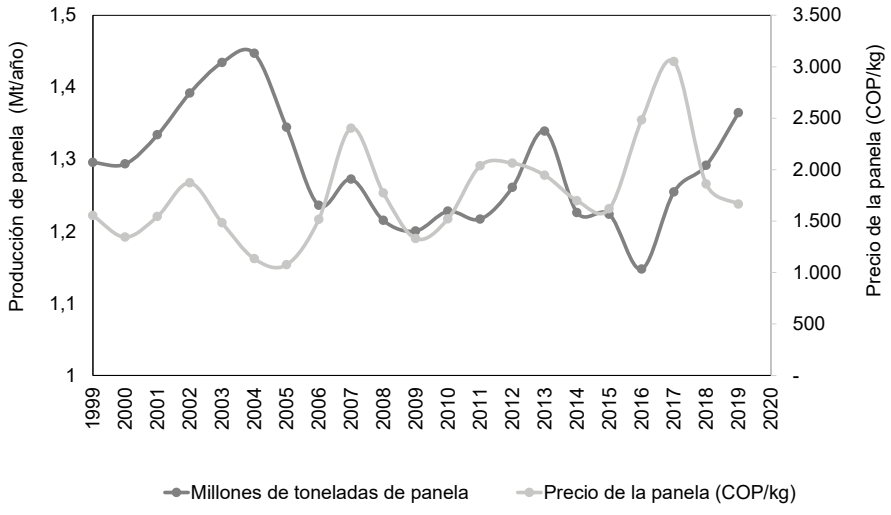


Figura 14.2. Comportamiento de la producción anual de panela y precio pagado al productor en Colombia durante el periodo 1999-2020.

Fuente: Elaboración propia

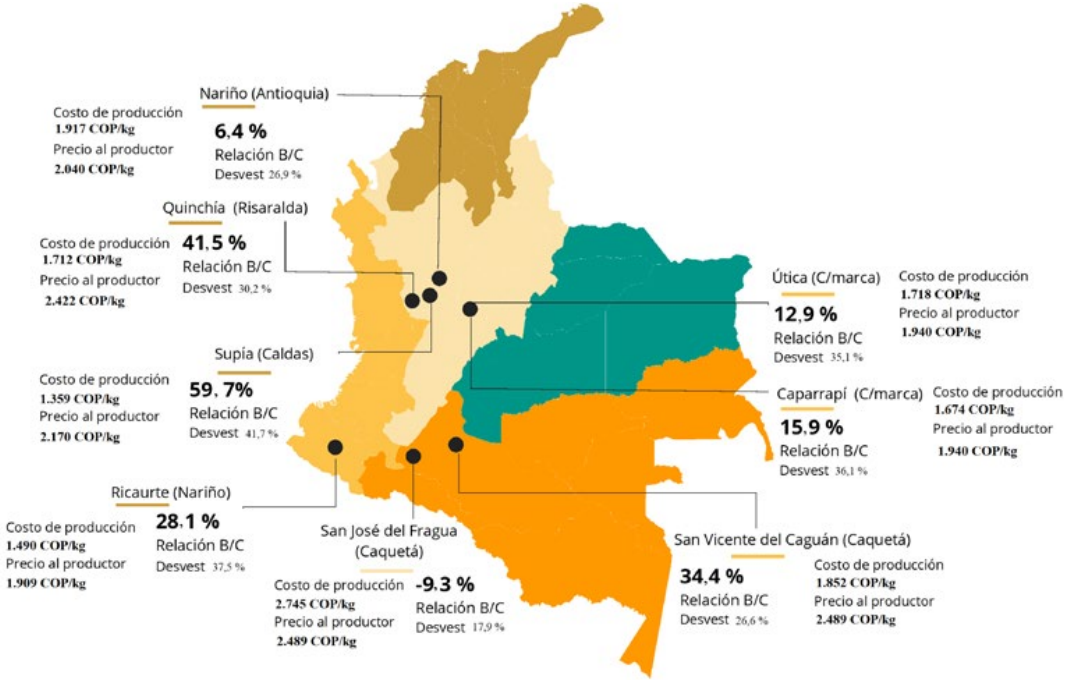


Figura 14.3. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 1.

Fuente: Elaboración propia

de utilidad por unidad de producto vendido se registraron en los municipios de Convención (Norte de Santander) y San José de Pare (Boyacá), lo cual se puede explicar por los bajos costos unitarios de producción y los precios relativamente altos, especialmente en Norte de Santander, donde el precio de la panela fue superior al pagado en otras de las regiones paneleras de este grupo.

De otro lado, los menores niveles de utilidad de este clúster se presentaron en Guadalupe (Antioquia) y San Agustín (Huila), debido a que se conjugó una situación de precios de venta relativamente bajos y costos unitarios de producción relativamente altos, lo cual generó que se tuvieran bajas tasas de rentabilidad por unidad de panela producida. Cabe destacar que en el caso de Nocaima (Cundinamarca) la confluencia de un alto costo de producción y un bajo precio promedio de venta generó una situación de pérdidas y una rentabilidad negativa que tan solo fueron superadas en el escenario de precio de venta máximo.

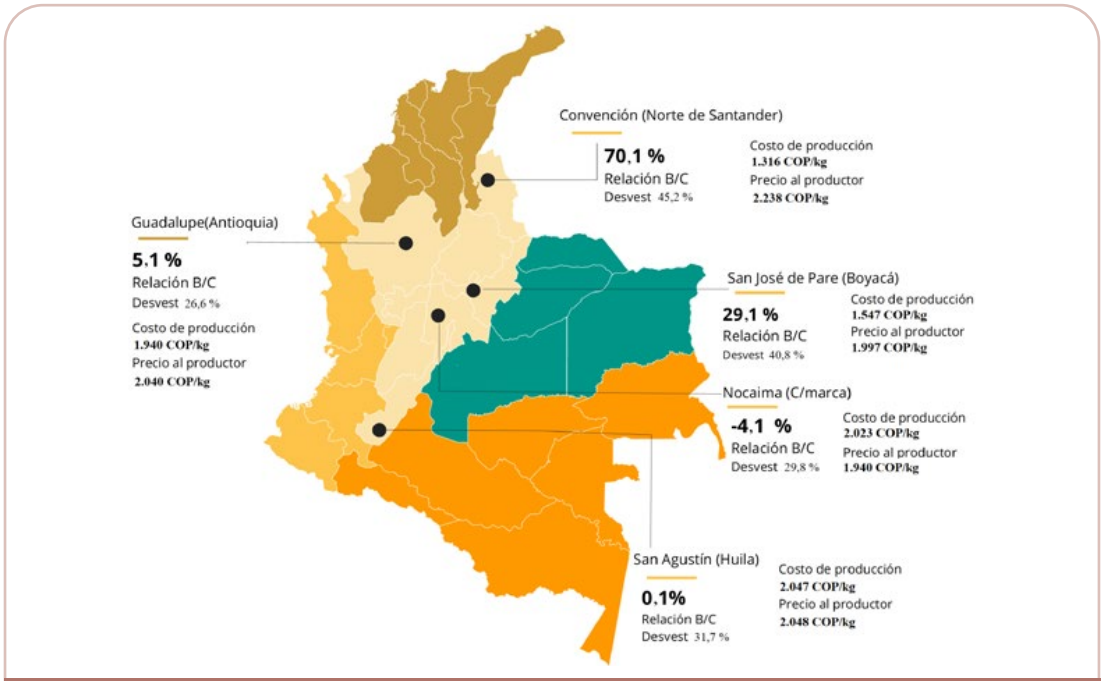


Figura 14.4. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 2.

Fuente: Elaboración propia

En el clúster 3, la utilidad promedio fue de 305,7 COP/kg de panela, y la tasa de rentabilidad media fue del 18,4 %. Las unidades productivas con mayor utilidad por unidad de panela producida fueron las de Frontino (Antioquia) y Linares (Nariño), debido principalmente a la escala de producción y la tecnología usada en el proceso, lo que conduce a optimizar los costos unitarios de producción. Los menores niveles de utilidad en este clúster se presentaron en Alvarado (Tolima), debido a que se reportó un alto costo de producción, y en Cajibío (Cauca), donde se presentó un bajo precio de venta de la panela, lo cual afectó directamente la rentabilidad (figura 14.5).

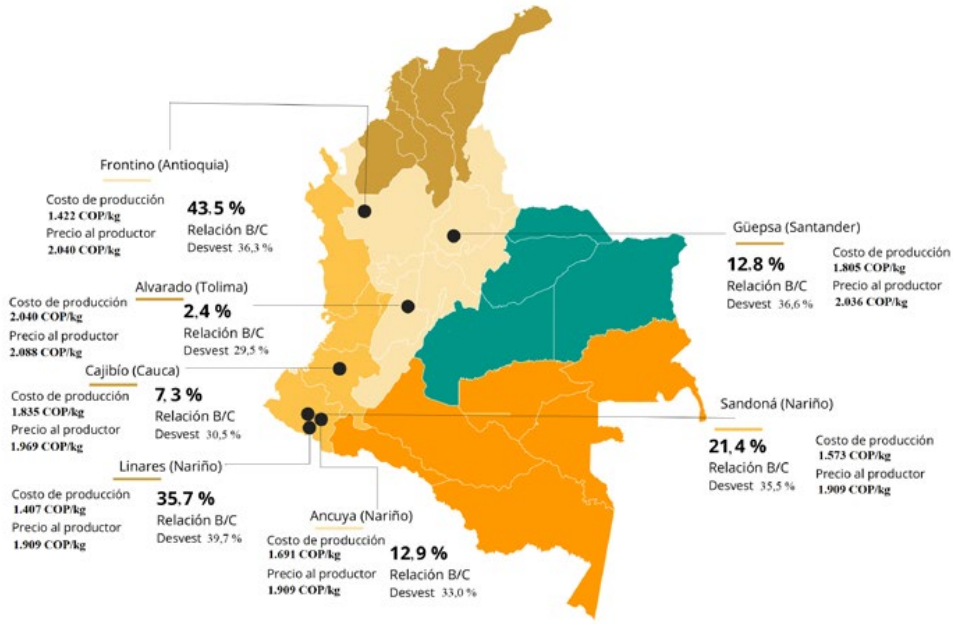


Figura 14.5. Rentabilidad de la producción panelera en el clúster 3.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Los costos de producción por unidad de producto varían inversamente respecto al nivel de adopción tecnológica; esto es, a mayor adopción de tecnologías de cultivo y procesamiento, menores son los costos unitarios de producción de la caña y la panela, lo cual brinda ventajas competitivas a los productores. En cuanto a la variación estacional del precio de la panela en Colombia durante los meses de noviembre, diciembre y enero, se presentan aumentos de precios, y en los meses de marzo, agosto y septiembre se presentan reducciones del precio; estas variaciones estacionales se encuentran en la banda de ±10 %. De igual manera, se observó que se presenta una alternancia de condiciones de bonanza y depresión de los precios con una duración de cinco a seis años y una tendencia creciente de los precios reales.

Recomendaciones

Se recomienda unificar la metodología de estructuración de costos desarrollada y aplicada por AGROSAVIA en diferentes sistemas paneleros regionales; esta constó de talleres de consenso con paneles de productores, previamente tipificados por sus características socioeconómicas y tecnológicas. Se hace esta recomendación, pues la realización de entrevistas individuales a productores puede carecer de representatividad regional de los productores seleccionados, lo cual genera grandes sesgos y errores en la toma de decisiones basadas en los costos de producción estimados de esta manera. En este sentido, un trabajo conjunto y complementario entre AGROSAVIA y Fedepanela sería deseable para afinar la metodología de estructuración de costos y el análisis financiero de la producción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Fedepanela por suministrar información sobre precios y costos, pues fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Alarcón, Á. L., Orjuela, A., Narváez, P. C., & Camacho, E. C. (2020). Thermal and rheological properties of juices and syrups during non-centrifugal sugar cane (jaggery) production. *Food and Bioproducts Processing*, *121*, 76-90. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.016

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (2018). Informe final del proyecto "Indicadores de impacto ambiental de la agroindustria panelera" [documento interno].

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2017). Particularidades del cultivo de la caña panelera (*Saccharum officinarum* L) en Colombia. *Boletín Mensual Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria*, (57). https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_mar_2017.pdf

Fedepanela. (2021). Sistema de Información Panelera (SIPA). http://www.sipa.org.co/wp/

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2021). *Evaluaciones Agropecuarias* - EVA *y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario*. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59

Ramírez Gómez, M., Martínez Covaleda, H. J., Ortiz, L. X., González, F. A., & Barrios, C. A. (2004). *Respuestas de la oferta y la demanda agrícola en el marco de un TLC con Estados Unidos* [documento de trabajo 49]. Observatorio Agrocadenas Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7570/BVE19039855e.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rodríguez Borray, G. A., Polo Murcia, S. M., Riveros, M. Á., & Buitrago Ardila, A. M. (2020). *La agroindustria panelera impulsando el desarrollo rural en Colombia: un diagnóstico de la cadena productiva*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA); Fedepanela. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36696

Tomek, W. G., & Kaiser, H. M. (2014). *Agricultural product prices* (5.ª ed.). Cornell University Press.



Capítulo 15

Indicadores ambientales del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar para la producción de panela en Cundinamarca

Bellanid Huertas-Carranza, Jose Luis Tauta-Muñoz, Gonzalo Alfredo Rodríguez-Borray, Sonia Mercedes Polo-Murcia y Ginna Natalia Cruz-Castiblanco

Resumen

Este capítulo presenta los resultados de evaluación ambiental de tres modelos tecnológicos de la producción de panela en Cundinamarca, mediante el análisis de ciclo de vida (ACV), y la estimación de la erosión hídrica superficial de suelo en dos sistemas representativos de cosecha de caña de azúcar para panela en la región. Se evidenció un mayor impacto ambiental en el modelo que combina el uso de agroquímicos en el cultivo, el corte por parejo de la caña de azúcar, la utilización de motores de combustión en la molienda y el uso de hornillas tradicionales para la elaboración de la panela. Además, se determinó que la erosión potencial es mayor en el sistema de corte por parejo que en el de corte por entresaque. Lo anterior indica que es necesario desarrollar recomendaciones tecnológicas, teniendo en cuenta las ventajas ambientales que se puedan presentar en un sistema de menor nivel de tecnificación, buscando aumentar la productividad y rentabilidad del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela.

Palabras clave: ciclo de vida, erosión, corte de caña, tipificación

Introducción

La intensificación de los cultivos es uno de los medios para incrementar la producción agrícola; sin embargo, este manejo puede socavar la estructura, biodiversidad y funcionalidad de los ecosistemas, promover la degradación de los suelos, interrumpir el ciclaje natural de nutrientes e impactar sobre la calidad y cantidad de agua, los mecanismos de polinización y el control de plagas, entre otros. Además, el incremento de la producción agrícola a expensas de los servicios ecosistémicos puede disminuir la sostenibilidad de los agroecosistemas y la producción de alimentos (Palm et al., 2014), ya que la agricultura es una de las actividades humanas con mayor impacto sobre los recursos naturales. Algunos sistemas de manejo y sus usos pueden aumentar la pérdida de suelo hasta niveles intolerables (Oliveira et al., 2013), y la intensificación del manejo del suelo puede influenciar sobre su calidad, lo que afecta la magnitud de la erosión a lo largo del tiempo (Ramos et al., 2019; Vanwalleghem et al., 2017).

Como en cualquier otro proceso, ya que la industria panelera trae consigo varias cargas ambientales, asociadas a cada fase del ciclo de vida del cultivo, que son además potenciadas por la alta demanda del producto (Castañeda et al., 2017) y por su encadenamiento productivo, el ambiente se ve afectado por producciones poco amigables y escasamente eficientes (Quezada-Moreno et al., 2020). En Colombia, el sistema productivo de caña de azúcar para producción de panela se maneja mediante dos sistemas: el primero incluye siembra en cajuela, generalmente sin renovación, con cepas de más de quince años de edad, cortes por entresaque o desguíe, sin posibilidad de mecanizar, con poca o nula fertilización, generalmente asociado a zonas de ladera y a la economía campesina en los departamentos de Cundinamarca, Caldas, Caquetá, Cauca, Huila, Tolima, Norte de Santander, Risaralda, Antioquia y el norte del Valle. El segundo sistema es el de siembra a chorrillo, con corte por parejo, con posibilidad de mecanizar, con altas dosis de fertilizantes, generalmente asociado a zonas con pendientes moderadas o planas

y a la economía empresarial en los departamentos de Boyacá, Santander y Valle del Cauca (Rodríguez Borray et al., 2020).

Dada esta dualidad de sistemas productivos, es pertinente evaluar cada sistema en términos ambientales, específicamente en variables como el consumo de energía, el efecto sobre los recursos naturales —impacto ambiental— y la erosión potencial del recurso suelo, que afecta el rendimiento del cultivo en el corto plazo y atenta contra la sostenibilidad del sistema productivo en el mediano y largo plazo (Tauta et al., 2018). La evaluación de estos aspectos permite identificar los eslabones que presentan las mayores ineficiencias y cargas ambientales en la cadena, así como establecer comparaciones entre los sistemas de producción. García et al. (2011) identificaron siete problemas en el proceso que repercuten en impactos ambientales, entre los que se encuentran el desaprovechamiento energético, la deforestación, la contaminación de aire, agua y suelo, la falta de eficiencia térmica en los sistemas de generación de calor, pérdidas de jugo en la extracción y desarrollo empírico de tecnología. Dado que en el mundo existen pocos estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) sobre la panela, y ninguno con suficiente difusión en Colombia, se conoce poco acerca de las cargas ambientales de la producción de este alimento a nivel técnico (Castañeda et al., 2017).

La evaluación del impacto ambiental permite que quienes toman decisiones identifiquen los posibles impactos ambientales de los sistemas propuestos, a fin de evaluar los enfoques alternativos para diseñar e incorporar medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2012). Considerando lo anterior, los objetivos del presente estudio fueron 1) evaluar el impacto ambiental de las fases de cultivo y procesamiento de la caña de azúcar para la elaboración de panela, mediante el enfoque de ACV, y 2) medir y comparar los valores de erosión hídrica superficial en suelos característicos de una región panelera, con dos sistemas de manejo de la caña: corte por parejo y corte por entresaque. Si bien la evaluación ambiental se realizó para la región

panelera de Cundinamarca, sus resultados resultan útiles para otros departamentos, pues los modelos tecnológicos evaluados y los sistemas de corte seleccionados son representativos de la mayor parte de las regiones paneleras colombianas.

Metodología

Impactos ambientales potenciales en la producción de panela

La evaluación se realizó en tres tipologías de producción —denominadas "modelos tecnológicos"—, identificadas en la región panelera del occidente de Cundinamarca, conocida como la provincia de Gualivá, donde se destacan por su producción panelera los municipios de La Peña, Nimaima, Nocaima, Quebradanegra, Útica y Villeta. Las tipologías se obtuvieron a partir de un proceso de tipificación estadística según las características técnicas y la escala de producción de las unidades productoras, en las fases de cultivo y procesamiento de la caña. La tipificación se obtuvo a partir de información primaria recolectada en un total de 115 unidades productoras, ubicadas en los municipios más representativos de la región del Gualivá en cuanto a producción de panela. Por medio de un análisis de datos mixtos (FMDA) y una construcción de clúster jerárquico, se determinaron las tres tipologías de producción o modelos tecnológicos. Este proceso se realizó utilizando el *software* libre R 3.2.1, y se siguió la metodología detallada por Rodríguez-Borray et al. (2022). Del análisis de clúster jerárquico, el *software* determinó cinco individuos por cada tipología, y su representatividad se consideró según las variables de tipificación mencionadas previamente. De esta forma, se seleccionó un individuo por cada modelo tecnológico, al que se le realizó un inventario de ACV completo, como se indica más adelante.

Las variables de tipificación para la fase de cultivo fueron el área en caña (ha), el tipo de fertilización, el manejo de malezas y el sistema de corte o método de cosecha. En cuanto a la fase de procesamiento, las variables de tipificación fueron el tipo de tracción del

molino, la cámara de combustión, el tipo de hornilla, la capacidad de producción y la conversión de caña a panela (tabla 15.1).

Tabla 15.1. Características de los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca

	Modelo tecnológico		Tradicional	Orgánico	Tecnificado
	Municipio		Quebradanegra	Nocaima	Quebradanegra
Variables de localización	Coordenadas	Longitud (N)	5° 5' 47,6''	5° 4' 28,2''	5° 6' 74''
		Latitud (W)	74° 30' 83,4''	74° 24' 28,4''	74° 29' 8,16''
	Altitud (m s. n. m.)		1.337	980	930
Variables de tipificación de fase de cultivo	Área en caña (ha)		5	19	100
	Tipo de fertilización		Química	Orgánica	Mixta
	Control de arvenses		Químico	Manual	Mixto
	Método de cosecha		Entresaque	Entresaque	Por parejo
	Productividad de panela (t/ha)		3,32	1,24	4,25
Variables de tipificación de fase de procesamiento	Tracción del molino		ACPM	ACPM	Eléctrico
	Cámara de combustión		Plana	Plana	Ward
	Tipo de hornilla		Tradicional	Mejorada	Mejorada
	Capacidad de la hornilla (kg/ha)		111,8	100,0	205,0
	Conversión de caña a panela (%)		10,7	12,8	13,0

Fuente: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (2018)

Para efectos de realizar el ACV, el proceso de producción de panela se distribuyó en ocho operaciones: cultivo de caña, molienda de caña, prelimpieza de jugo, precalentamiento de jugo, clarificación de jugo, evaporación de agua, concentración de miel y batido-moldeo-empaque de panela. En los casos en los que existe almacenamiento de jugo, se agregó esta operación al modelo. Las cargas ambientales se estimaron a partir de la medición de las

cantidades de insumos, flujos de materia y energía, rendimientos (kg de caña/ha), porcentajes de extracción de jugos, conversión de caña a panela, vida útil de los equipos, entre otras variables, a las que se les dio una asignación temporal de acuerdo al enfoque de ACV, con lo que se construyó un análisis "desde la cuna hasta la puerta del negocio", es decir, desde la producción de caña de azúcar para producción de panela, como materia prima, hasta el empaque y alistamiento del producto final (panela) en el trapiche, para su posterior transporte y distribución.

El ACV en el sistema productivo se hizo en cuatro fases basadas en el protocolo internacional establecido por la ISO 14040 y la ISO 14044, ambas de 2006:

a. Definición del objetivo y alcance del estudio con respecto al sistema por evaluar: el objetivo fue determinar los impactos ambientales potenciales en los diferentes modelos tecnológicos para la producción de panela. El enfoque del estudio es desde la cuna hasta la puerta del negocio, tomando como sistema de primer plano las entradas y salidas en el cultivo de caña de azúcar y en el proceso de elaboración de panela. El sistema de segundo plano está contemplado desde la extracción de insumos, su proceso y transporte, aspectos contemplados en los registros de recolección. La unidad funcional (UF) de análisis corresponde a una tonelada de panela.

b. Recopilación del inventario de entradas y salidas del sistema productivo: los datos de inventario de la infosrmación técnica para la cuantificación de flujos de materia, energía y emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema de producción de panela fueron colectados en visitas a las fincas representativas de cada modelo tecnológico (una unidad productiva por cada tipología de producción).

c. Evaluación del impacto ambiental potencial: con la información del inventario, se determinaron los impactos ambientales potenciales de cada modelo productivo, mediante el *software* Umberto NXT LCA, cuya interfaz gráfica permite definir los flujos

de materiales o energía, así como establecer cuantitativamente el impacto medioambiental durante el proceso (Sierra et al., 2019). Además, Umberto NXT LCA tiene vinculadas las mayores bases de datos del mundo, con las entradas y salidas de muchos productos a lo largo de su ciclo de vida, entre las que se destacan GaBi y Ecoinvent (Sierra et al., 2019). Esta segunda base de datos fue la seleccionada para el presente estudio. Las categorías de impacto evaluadas fueron la siguientes:

- Cambio climático: también conocido como calentamiento global o emisión de gases de efecto invernadero, se define como el impacto de las emisiones antropogénicas en la absorción de la radiación térmica por la atmósfera terrestre, lo que causa un incremento en la temperatura de la corteza terrestre (Garraín, 2009).
- Acidificación: se define como la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua (Garraín, 2009).
- Eutroficación: designa el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema acuático, el cual se produce por la acumulación de materia orgánica y mineral (Garraín, 2009).
- Ecotoxicidad: medida de impacto de contaminantes que causan toxicidad a los ecosistemas (Roux et al., 2014). Para este estudio, se incluyeron las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre, acuática y marina.
- Oxidación fotoquímica: también conocida como esmog, hace referencia al proceso mediante el cual un oxidante fotoquímico, junto a los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno (quema de combustible, emisiones industriales, etc.), forma el esmog fotoquímico (Roux et al., 2014).
- Competencia por uso del suelo.

d. Interpretación del ACV: por último, en la fase de interpretación, se combinaron los resultados del análisis del inventario con la evaluación del impacto, y se determinaron los puntos del proceso con mayores cargas ambientales y susceptibles de mejora.

Estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica superficial en dos sistemas de cosecha de la caña

Los experimentos para la estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica superficial en los dos sistemas de corte se llevaron a cabo en una finca del municipio de Quebradanegra, en las coordenadas geográficas 5° 6' 50,53'' de latitud norte y 74° 18' 9,28'' de longitud oeste, a una altitud de 932 m s. n. m. En el municipio se registra una temperatura media anual de 21 °C y una precipitación anual de 1.628 mm. Las mediciones de erosión hídrica superficial se realizaron en un vertisol identificado como *typic haplusterts* isohipertérmico, muy fino, con alta presencia de arcillas expandibles, grietas, superficies de deslizamiento, pedregosidad esporádica y estructuras en forma de cuña, con buen drenaje natural y limitaciones de uso debido a fuertes pendientes y baja retención de humedad.

Los sistemas o tratamientos de cosecha de caña evaluados correspondieron a 1) corte por entresaque, 2) corte por parejo en primera siembra (plantilla) y 3) corte por parejo en cosechas posteriores a la primera (socas). Además, para cada sistema de corte se identificaron áreas con dos rangos de pendiente: pendiente suave (10-25 %) y pendiente fuerte (35-50 %). Finalmente, se tuvieron, como factores de variación en la pérdida de suelo, tres valores de intensidad de precipitación, correspondientes a 30,81, 44,76 y 78,76 mm/h, los cuales se obtienen al variar el tamaño de las boquillas del simulador. De esta forma, se definió un diseño experimental en parcelas subsubdivididas: el factor de división fue el corte, el factor de subdivisión fue la pendiente y el factor de subsubdivisión fue la intensidad de precipitación. Además, se incluyó un análisis de medidas repetidas en el tiempo con diferencia de tres meses; de esta forma, se tomaron mediciones en el momento del corte (en el caso del entresaque, se seleccionó uno de los cortes realizados al azar), a los tres meses del corte y a los seis meses. En el caso de plantilla, no se incluyó esta repetición en el tiempo, ya que se estableció solo como un tratamiento de referencia, al tener un suelo desnudo, sin cobertura vegetal.

Para identificar los factores o la interacción de los factores que influían en la variación de la pérdida de suelo, se realizó un análisis de varianza con el *software* SAS, teniendo en cuenta el diseño de parcelas subsubdivididas y las mediciones repetidas en el tiempo. Luego, para identificar los niveles dentro de los factores o de la interacción de los factores que establecían las diferencias específicas, se incluyó una comparación de medias con la prueba de Tukey. La identificación de los lotes de medición se correspondió con el sistema de corte (plantilla, por entresaque y por parejo) y el rango de la pendiente (suave y fuerte), como se presenta a continuación:

- Lote plantilla (o primera siembra) de pendiente suave
- Lote plantilla (o primera siembra) de pendiente fuerte
- Lote en corte por entresaque de pendiente suave
- Lote en corte por entresaque de pendiente fuerte
- Lote en corte por parejo de pendiente suave
- Lote en corte por parejo de pendiente fuerte

Para realizar la evaluación de erosión, se identificaron dentro de la finca áreas o lotes en los que se realizara cada uno de los sistemas previamente descritos. Es decir, en el área de estudio se encontraron algunos lotes en los que se realizaba el corte por entresaque y otros en los que se llevaba a cabo el corte por parejo; además, el productor tenía un área en la que se estaba realizando la preparación del terreno para una primera siembra de caña, la cual iba a ser manejada por corte por parejo (manejo seleccionado por el mismo productor). De esta forma, en cada una de las áreas se establecieron dos tipos de pendiente, de acuerdo con la topografía de la finca; así, como se indicó anteriormente, en cada sistema de corte se estableció un área con pendiente suave y un área con pendiente fuerte, y de esta manera se identificaron los seis lotes mencionados, cuya única restricción era que debían tener un mínimo de 35,64 m^2 de área, ya que dentro de cada uno se ubicaron cuatro parcelas de medición de 8,91 m^2 (parcelas de 2

m de ancho × 4,46 m de largo, ubicadas siempre en el sentido de la pendiente).

Al tener identificados los lotes, se tomaron algunos datos de variables hidrofísicas y químicas del suelo, como velocidad de infiltración del agua, densidad aparente, densidad real, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica y clase textural, y se verificó la pendiente en campo y se midió el porcentaje de cobertura en cada parcela de medición. Luego, mediante un simulador móvil de lluvia diseñado por el equipo de trabajo del proyecto, cuyos emisores estaban ubicados a 5 m de altura sobre la superficie del suelo, se simularon las tres intensidades de lluvia mencionadas previamente, las cuales se obtuvieron de los patrones históricos de precipitación pluvial de la región. Antes de cada medición, se verificó que el suelo no estuviera saturado, caso en el cual se esperó entre seis y ocho horas antes de llevar a cabo la simulación de precipitación; además, se tomó una muestra de suelo para determinar la humedad en cada medición. De esta forma, para cada intensidad de lluvia se obtuvieron cuatro repeticiones, correspondientes a las cuatro parcelas ubicadas en cada combinación de sistema de corte y pendiente (lotes de medición). Finalmente, como se indicó antes, las mediciones se realizaron en tres momentos (con un lapso de tres meses entre sí). En cada prueba se recogió y midió el volumen de agua de escorrentía y se pesó el suelo perdido; además, se tomó una alícuota de 200 mm de mezcla de agua-suelo y se llevó al laboratorio. En la figura 15.1 se sintetizan los pasos metodológicos de la evaluación.

En el laboratorio se realizó el procesamiento de cada una de las muestras obtenidas, pasándolas por un embudo Büchner, en el cual se puso un papel filtro con el fin de separar las partículas sólidas del suelo del agua de escorrentía; luego, se secó la muestra en horno a 60 °C durante 24 h, y se pesó el suelo seco correspondiente. En esta etapa se determinó la relación entre

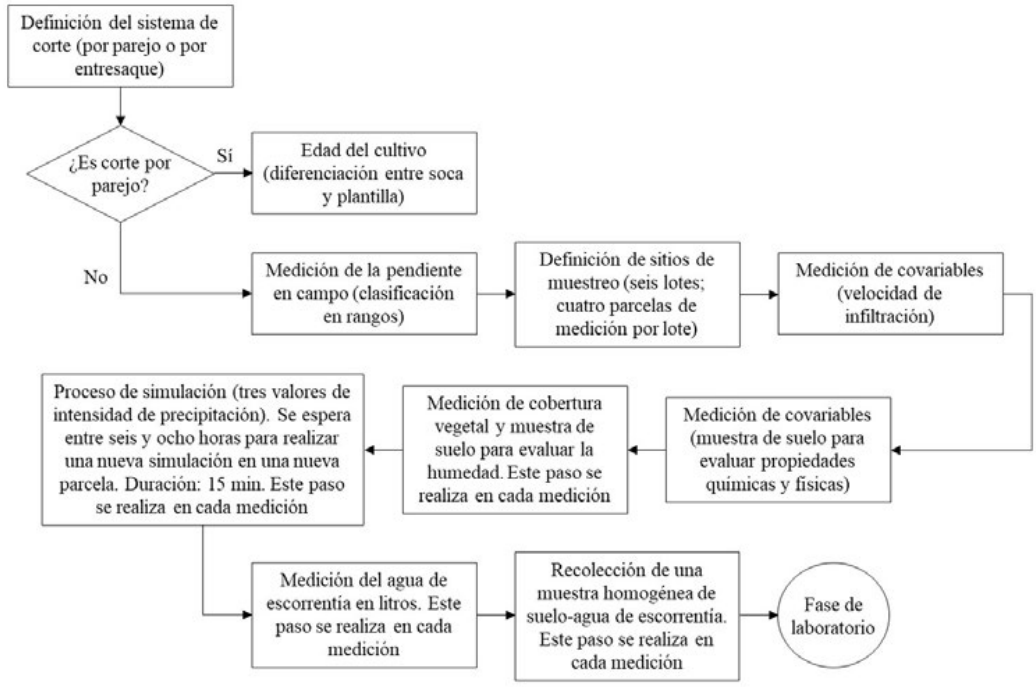


Figura 15.1. Diagrama de flujo del procedimiento en campo para medir la erosión hídrica superficial.

Fuente: Elaboración propia

la cantidad de suelo recogido en la muestra llevada a laboratorio, la cantidad total de agua recogida en campo y el área de la parcela de escorrentía. Finalmente, se realizó una caracterización textural y de propiedades químicas de las muestras correspondientes al suelo perdido (SP).

Para determinar el SP (g) por medición y la pérdida de suelo por hectárea (PS, kg/ha) correspondiente a cada medición, se aplicaron las ecuaciones 15.1 y 15.2:

$$SP = \frac{SS}{TM} * MC \qquad (15.1)$$

$$PS = \frac{SP}{8{,}91 * 1.000} * 10.000 \qquad (15.2)$$

Donde SS es el peso del suelo seco en laboratorio, expresado en g; TM (L) es el tamaño de la muestra de agua de escorrentía procesada en laboratorio; MC (L) es la medida de agua de escorrentía tomada en campo; 8,91 corresponde al área de la parcela de escorrentía en metros cuadrados; 1.000 es el factor para pasar de gramos a kilogramos, y 10.000 es el factor para pasar de metros cuadrados a hectáreas.

Finalmente, se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) (Wichmeier & Smith, 1960), para obtener un factor C asociado al tipo de corte, utilizando los datos obtenidos en campo: la erodabilidad, calculada a partir de las variables medidas en los suelos, y la erosividad, determinada para cada intensidad de precipitación simulada (Tauta et al., 2018).

Resultados y discusión

A continuación, se presentan y discuten los resultados de los impactos ambientales determinados para los tres modelos tecnológicos de producción de panela identificados, según como se mencionó en la metodología, y la comparación de erosión hídrica superficial entre los dos sistemas de corte de caña de azúcar para producción de panela en el área de estudio del departamento de Cundinamarca.

Impactos ambientales potenciales en la producción de panela

Los resultados de los impactos ambientales potenciales se presentan en la tabla 15.2, donde se muestran las cargas ambientales calculadas por el *software* Umberto NXT LCA, teniendo en cuenta factores incluidos en la base de datos Ecoinvent (Weidema et al., 2013), al subir al sistema todo el inventario de cada etapa del proceso en campo, para cada modelo tecnológico, como se indicó en la metodología. Así, se encontró que el modelo tecnológico de manejo tradicional presenta las mayores cargas ambientales

potenciales en las categorías de cambio climático (421,78 kg de CO_2-eq), acidificación (318,97 kg de SO_2-eq), eutroficación (88,07 kg de PO_4-eq), toxicidad humana (640,60 kg de 1,4-DCB-eq) y ecotoxicidad marina (535,40 kg de 1,4-DCB-eq); este modelo presenta problemas tecnológicos que inciden directamente en el proceso de producción, la rentabilidad y la sostenibilidad económica (González Campaña & Zúñiga Cabrera, 2022).

Los más altos aportes en estas categorías de impacto están asociados al uso de fertilizantes de síntesis química y de agroquímicos para el control de malezas en el cultivo, al uso de ACPM como combustible para accionar el molino y a la baja eficiencia de la hornilla tradicional, que implica un mayor uso de combustibles adicionales al bagazo, como madera, carbón y en algunas ocasiones llantas, así como mayores emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de panela producida. Para un modelo de producción similar, mediante una metodología de evaluación de matriz de impactos, González Campaña y Zúñiga Cabrera (2022) identificaron que los principales problemas ambientales se relacionaban con la afectación de las aguas superficiales y subterráneas, la flora y fauna terrestre y la salud de los trabajadores; además, establecieron que la acción que más afecta al ambiente es la combustión del bagazo y la leña.

El modelo tecnológico de manejo tecnificado presenta las menores cargas ambientales en las categorías de acidificación (136,64 kg de SO_2-eq), cambio climático (185,73 kg de CO_2-eq), eutroficación (13,94 kg de PO_4-eq), ecotoxicidad acuática (44,18 kg de 1,4-DCB-eq), ecotoxicidad terrestre (14,51 kg de 1,4-DCB-eq), oxidación fotoquímica (0,37 kg de ozono formado) y competencia por uso del suelo (235,41 m^2a). Los menores impactos ambientales de este modelo se atribuyen principalmente a la fase de procesamiento de la caña, con la utilización de motores eléctricos para accionar los molinos, y a la mayor eficiencia energética de las hornillas mejoradas con cámara de combustión tipo Ward-Cimpa, que permiten eliminar el uso de combustibles adicionales al bagazo y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero

por unidad de panela. Castañeda et al. (2017) determinaron una reducción del 3,82 % en la carga ambiental total al modificar un motor accionado con ACPM por uno accionado con energía eléctrica, y Quezada-Moreno et al. (2020) recomiendan reemplazar los motores de ACPM por motores eléctricos para disminuir el ruido y la generación de gases producto del uso de combustibles fósiles.

Tabla 15.2. Estimación de las cargas ambientales en los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca

Categorías de impacto	Unidad	Modelo tradicional	Modelo orgánico	Modelo tecnificado
Cambio climático (GWP 100a)	kg CO_2-eq	421,78	368,23	185,73
Toxicidad humana (HTP 100a)	kg 1,4-DCB-eq	640,60	136,04	344,25
Acidificación	kg SO_2-eq	318,97	173,83	136,64
Eutroficación	kg PO_4-eq	88,07	82,80	13,94
Ecotoxicidad terrestre (TAETP 100a)	kg 1,4-DCB-eq	16,71	87,17	14,51
Ecotoxicidad acuática (FAETP 100a)	kg 1,4-DCB-eq	149,36	163,86	44,18
Ecotoxicidad marina (MAETP 100a)	kg 1,4-DCB-eq	535,40	183,15	311,70
Oxidación fotoquímica	kg de ozono formado	0,75	5,71	0,37
Competencia por uso de suelo	m^2a	301,24	808,74	235,41

Nota: Las celdas rojas indican los mayores valores de impacto, y las verdes, los menores; las unidades son calculadas por tonelada de panela.

Fuente: AGROSAVIA y Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (2018)

De otro lado, el modelo tecnológico orgánico presenta los menores impactos en toxicidad humana (136,04 kg de 1,4-DCB-eq) y ecotoxicidad marina (183,15 kg de 1,4-DCB-eq), pero los mayores impactos en ecotoxicidad acuática (163,86 kg de 1,4-DCB-eq) y en competencia por uso del suelo (808,74 m^2a). Las demás categorías de impacto presentan valores intermedios a los presentados por los modelos tecnológicos tradicional y tecnificado. La menor toxicidad humana obtenida en este modelo tecnológico se podría asociar con la eliminación de insumos químicos tanto en el cultivo como en el procesamiento; por el contrario, la mayor competencia por el uso del suelo se explica por un bajo nivel de productividad de caña por hectárea cosechada, que en el modelo orgánico corresponde a 27,3 t/ha, mientras que en los modelos tradicional y tecnificado es de 53,5 y 68,2 t/ha, respectivamente. Castañeda et al. (2017) obtuvieron un resultado similar, pues determinaron, en un sistema de producción tradicional, que la categoría de competencia por el uso del suelo representó un 52 % del total de la carga ambiental (1.138,2 m^2a).

Aunque en los modelos tecnológicos orgánico y tradicional se utilizan hornillas con alguna mejora, como la inclusión de una paila pirotubular para lograr una mayor eficiencia térmica, las cámaras de combustión son tradicionales y esto puede repercutir en los impactos sobre el ambiente. El modelo tecnológico tecnificado, al tener mejores rendimientos de caña por área, mayores áreas de siembra y una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa, que tiene entre sus ventajas tecnológicas la posibilidad de emplear bagazo con mayor humedad, permite aumentar la eficiencia del proceso en el sistema. Este aspecto concuerda con lo determinado por Soler y Gómez (2004), quienes encontraron que este tipo de cámara presenta una eficiencia energética del 40 %, en contraste con el 35 % que presenta la cámara plana tradicional, lo que permite disminuir el impacto en la categoría de cambio climático, como se observa en los resultados de este estudio.

Al analizar la contribución de cada operación de la producción de panela al impacto en cuanto a cambio climático (figura 15.2), se

encontró que en el modelo tecnológico tradicional las mayores contribuciones se presentan en el cultivo, con una carga ambiental de 147,6 kg de CO_2-eq/tonelada de panela. Esta carga se relaciona principalmente con el uso de fertilizantes y herbicidas químicos, en cuya fabricación se emiten apreciables cantidades de gases de efecto invernadero. En ese modelo también se destacan las cargas ambientales de CO_2 equivalentes por las operaciones de precalentamiento de jugo y evaporación del agua, debido principalmente a la ineficiencia térmica de las hornillas tradicionales con cámara plana.

En el modelo tecnológico orgánico, las mayores emisiones se presentan en la operación de batido, moldeo y empaque, debido a que, en el caso de estudio de este modelo, la panela orgánica es troceada, granulada y empacada utilizando materiales de empaque y embalaje como polipropileno, cartulina o cartón marcados individualmente con distintivos especiales, en cuya fabricación y rotulación se emiten mayores cantidades de gases de efecto invernadero.

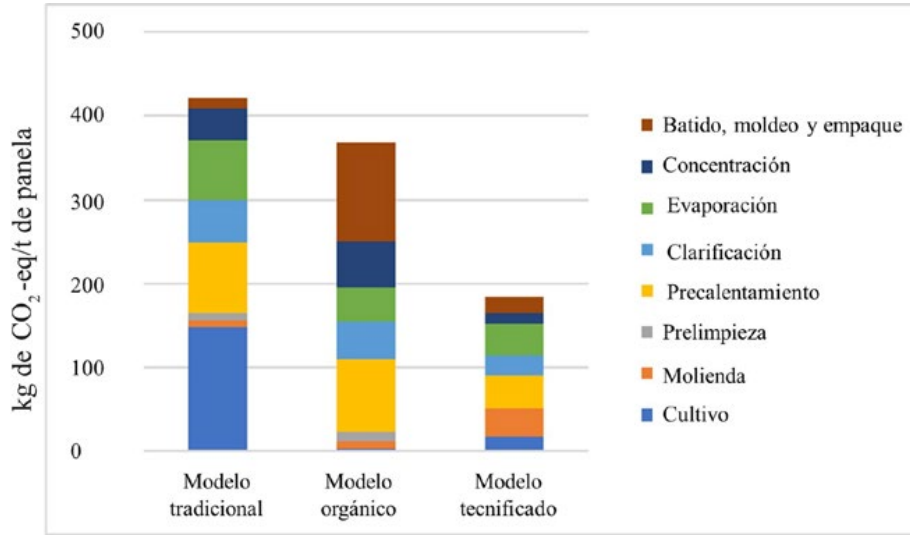


Figura 15.2. Huella de carbono por operación en los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia con base en AGROSAVIA y Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (2018)

Por su parte, el empaque en los modelos tradicional y tecnificado no representa una carga ambiental significativa en términos de CO_2, ya que en estos casos el empaque de la panela no necesita de los mismos materiales de empaque y rotulación. Castañeda et al. (2017), en la categoría de cambio climático, determinaron, para un modelo de producción tradicional, un valor similar al obtenido en este estudio para el modelo orgánico (314,08 kg de CO_2-eq).

En el modelo tecnificado, las mayores emisiones se presentan en las operaciones de molienda de la caña, precalentamiento y evaporación del agua del jugo de la caña; sin embargo, en la figura 15.2 se resaltan los mismos resultados que en la tabla 15.2, pues se presenta una reducción de carga ambiental en la categoría de cambio climático (gases de efecto invernadero) con respecto a los otros dos modelos tecnológicos. La contribución ambiental en la molienda con el modelo tecnificado se puede asociar con el tamaño y el peso de los equipos de molienda y el motor, especialmente por materiales como el acero y el hierro, en las etapas de fundición y moldeo. Quezada-Moreno et al. (2020) determinaron que la etapa de procesamiento causa mayor daño ambiental que la etapa agrícola en sistemas productivos de caña de azúcar para producción de panela en Ecuador.

Si bien las emisiones de CO_2 equivalente en todos los modelos tecnológicos son mayores durante las operaciones de precalentamiento y evaporación que en las demás etapas del proceso de producción de panela, se resalta que la carga ambiental en este proceso es menor en el modelo tecnológico tecnificado que en los otros dos modelos, lo cual se puede asociar al uso de hornillas con cámara de combustión tipo Ward-Cimpa, mejoradas en su eficiencia energética, respecto a las hornillas tradicionales y con cámara plana. En este sentido, en la figura 15.2 se observa que, mientras en las operaciones relacionadas con la hornilla —desde el precalentamiento de los jugos hasta la concentración de la miel— las emisiones en el modelo tecnificado suman 113,3 kg de CO_2-eq/t de panela, en los modelos orgánico y tradicional estas emisiones son de 228,3 y 244,6 kg de CO_2-eq/t, respectivamente, lo que indica que en estas operaciones la hornilla tecnificada con

cámara Ward-Cimpa permite reducir a menos de la mitad las emisiones que normalmente se tienen con las hornillas tradicionales. Con respecto a los sistemas tradicionales de producción de panela, Quezada-Moreno et al. (2020) mencionan que el insuficiente uso de tecnología, así como la calidad e inocuidad del producto y el desconocimiento de las propiedades nutricionales, influyen en el desarrollo del sistema, pues lo vuelven más artesanal que industrial, lo que afecta la sostenibilidad, la competitividad, la seguridad y la soberanía alimentaria.

Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en caña de azúcar para panela

Uno de los factores ambientales que más área afecta a nivel mundial es la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. En este estudio se realizó una evaluación de pérdida de suelo que buscó comparar el comportamiento de la erosión entre los dos sistemas de corte o métodos de cosecha tradicionalmente utilizados en caña de azúcar para producción de panela. Para iniciar la evaluación, se caracterizaron los lotes de medición, de acuerdo con lo indicado en la metodología, cuyos resultados se presentan en la tabla 15.3. Una característica importante para tener en cuenta en los vertisoles, clasificación de la que hacen parte los suelos del estudio, es su contenido de arcilla, que varía entre el 30 y el 80 %, pues este rango se asocia a suelos fuertemente agregados, por lo cual se erosionan en gran medida como material agregado (Freebairn et al., 1996). La erosión es una de las mayores limitaciones para la producción en suelos pertenecientes al orden vertisol, debido a sus bajas tasas de infiltración cuando están húmedos y a su alta erodabilidad relativa (Freebairn et al., 1996).

Tabla 15.3. Características físicas del suelo de los lotes seleccionados para la medición de la erosión hídrica superficial en caña de azúcar para panela en Quebradanegra, Cundinamarca

Característica	Corte por entresaque en socas		Corte por parejo en socas		Corte por parejo en plantilla		Cobertura natural	
	Media	cv	Media	cv	Media	cv	Media	cv
Diámetro medio ponderado (mm)	2,61	0,08	3,41	0,05	1,41	0,08	2,64	0,28
Agua aprovechable (%)	8,70	0,05	8,68	0,05	6,90	0,06	8,15	0,11
Porosidad total (%)	55,58	0,06	54,99	0,06	47,47	0,08	52,80	0,10
Infiltración básica (mm/h)	13,06	0,25	22,19	0,04	7,23	0,49	14,16	0,48
Contenido de arcilla (%)	40,29	0,12	47,26	0,05	31,05	0,06	41,47	0,18
Contenido de limo (%)	41,48	0,06	20,39	0,04	44,71	0,01	38,10	0,26
Contenido de arena (%)	27,00	0,09	31,15	0,07	27,63	0,09	28,36	0,10
Contenido de arena muy fina (%)	14,26	0,10	5,42	0,12	12,27	0,02	10,65	0,37
Materia orgánica (%)	7,16	0,14	7,09	0,10	5,87	0,09	6,78	0,14

cv: coeficiente de variación

Fuente: Tauta-Muñoz et al. (2023)

Al analizar estadísticamente los distintos resultados de las combinaciones de corte, pendiente, momento de medición e intensidad de precipitación, sin incluir la plantilla o primera siembra, es decir, solamente con los resultados de los lotes denominados "por parejo" y "por entresaque", por medio de un análisis de varianza, se determinó que la interacción entre el sistema de corte y el momento de medición fue la que más explicó las diferencias

en los valores de pérdida de suelo ($p = 0{,}0243$) (Tauta-Muñoz et al., 2023). Luego del análisis de varianza, se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey, en la que se resaltó la interacción entre el sistema de corte y el momento de medición como un factor diferenciador de niveles en pérdida de suelos, al comparar la pérdida de suelo justo después del corte, en el corte por parejo, con todas las demás combinaciones posibles de corte y momento, ya que esta pérdida de suelo es significativamente mayor que en todas las demás mediciones realizadas (Tauta-Muñoz et al., 2023). Un comportamiento similar fue observado por Oliveira et al. (2013), quienes determinaron, en plantaciones de eucalipto, que en las etapas iniciales de desarrollo fenológico el dosel apenas logra cubrir la superficie del suelo, exponiéndolo a una mayor erosión. En concordancia con estos comportamientos, Vanwalleghem et al. (2017) expresaron que el mismo uso de la tierra da como resultado tasas de erosión del suelo significativamente diferentes, debido a los efectos de las prácticas de manejo diferenciadas.

En la figura 15.3 se puede observar la comparación gráfica de las medias de pérdida de suelo obtenidas al comparar solamente los sistemas de corte por parejo y entresaque con los dos rangos de pendiente y los tres momentos de medición mencionados en la metodología.

La intensidad de precipitación también se resaltó como uno de los mayores factores de variación en la pérdida de suelo. En este caso, se observó una relación casi lineal con la pérdida de suelo, al presentarse un aumento en la pérdida de suelo cuanto se aumentó la intensidad de precipitación (Tauta-Muñoz et al., 2023). Al comparar los valores de pérdida de suelo obtenidos en los dos sistemas de corte, en el momento después del corte, con las mediciones realizadas en los lotes en plantilla (correspondientes a suelo desnudo, sin cobertura vegetal y con una siembra reciente de caña), se observa una diferencia estadística significativa ($p < 0{,}001$) entre este último caso y los dos sistemas de corte de caña ya establecidos, lo que evidencia que

las pérdidas de suelo en caña de azúcar para producción de panela son considerablemente mayores en suelos sin cobertura vegetal (Tauta-Muñoz et al., 2023).

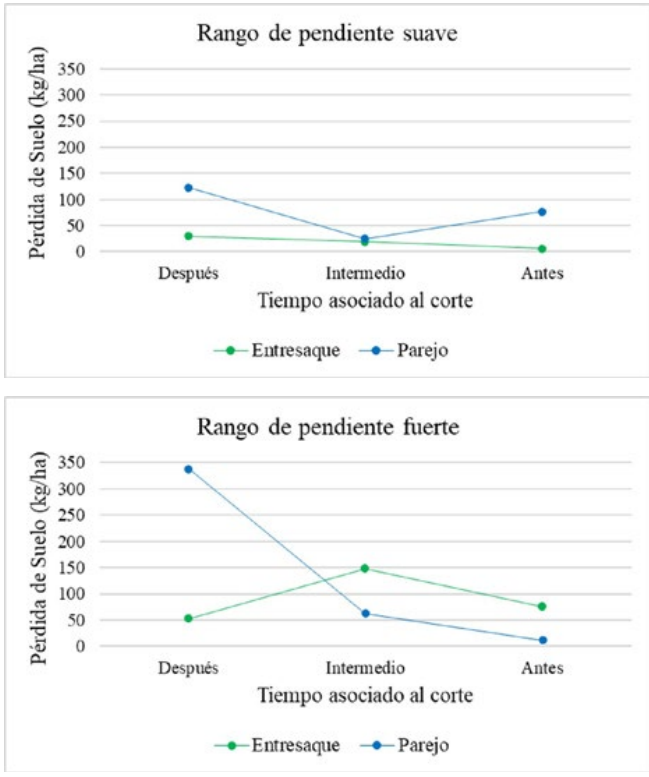


Figura 15.3. Pérdida de suelo en distintos momentos de medición asociados al corte.

Nota: "Después" se refiere a la medición realizada justo después del corte, "intermedio" se refiere a la medición realizada tres meses después y "antes" se refiere a la medición realizada antes del siguiente corte.

Fuente: Tauta-Muñoz et al. (2023)

Al respecto, diversos autores han resaltado la importancia de la cobertura vegetal para proteger al suelo contra agentes erosivos. Por ejemplo, Portela et al. (2018) determinaron que la cobertura vegetal con residuos de cultivo favorece la protección física; Teófilo-Salvador et al. (2019) encontraron que reduce la escorrentía superficial; Da Silva et al. (2019) determinaron que

minimiza la energía cinética de las gotas de lluvia y, por lo tanto, el transporte de material en la superficie, y Ramos et al. (2019) determinaron que los residuos de cultivo resultan ser más relevantes que la resistencia natural del suelo.

Con el factor C (Wischmeier & Smith, 1960), Tauta et al. (2018) determinaron la erosión potencial anual bajo los dos sistemas de corte, y observaron que el corte por parejo (27,07 t/ha/año) presenta un valor 2,2 veces mayor que el corte por entresaque (12,35 t/ha/año), pero, al mismo tiempo, 9 veces menor que la condición de suelo sin cobertura vegetal (250,36 t/ha/año). Los valores C estimados se presentan en la tabla 15.4, con sus respectivas desviaciones estándar (S_d) y sus coeficientes de variación (cv), para los tres momentos de medición y para cada tipo de corte.

Tabla 15.4. Factores C estimados para los sistemas de corte y los momentos de medición

Corte	Momento	Factor C					
		Media	S_d	cv	Media	S_d	cv
Entresaque	Después del corte	0,047	0,034	0,736	0,048	0,042	0,877
	A los tres meses del corte	0,054	0,050	0,928			
	A los seis meses del corte	0,044	0,043	0,974			
Parejo	Después del corte	0,114	0,152	1,332	0,105	0,126	1,200
	A los tres meses del corte	0,131	0,112	0,849			
	A los seis meses del corte	0,064	0,121	1,877			
Plantilla	—	0,978				0,815	0,833

S_d: desviación estándar

cv: coeficiente de variación

Fuente: Tauta et al. (2018)

Conclusiones

El ACV permitió visibilizar la importancia del desarrollo tecnológico en la producción de caña de azúcar para panela y los impactos ambientales que se generan al no adoptarlo. De otra parte, al comparar los sistemas de cosecha de caña de azúcar para producción de panela, se logró determinar que las pérdidas de suelo por erosión son 2,2 veces mayores en corte por parejo que en corte por entresaque (teniendo, en ambos casos, cultivos ya establecidos con al menos un corte previo). Esta pérdida se presenta especialmente justo después del corte, por lo que es en este momento cuando se deben aplicar las mejores prácticas de conservación de suelos. Independientemente del método de corte utilizado, la caña de azúcar para producción de panela puede ser considerada como un cultivo conservacionista en la región, pues se obtuvo un valor de erosión potencial nueve veces menor en el caso del corte por parejo respecto al valor de erosión en suelo sin cobertura vegetal o en plantilla.

A partir de los anteriores resultados, se recomienda investigar modelos tecnológicos de cultivo más eficientes y sostenibles para la región de estudio e integrarlos a los desarrollos logrados en la fase de procesamiento, con la adopción de hornillas paneleras eficientes y de bajo impacto ambiental. En particular, se deben desarrollar prácticas agroecológicas asociadas con el aumento de la capacidad productiva del suelo, para el manejo de la caña de azúcar para producción de panela por entresaque, que permitan mantener un bajo impacto erosivo, pero, a la vez, mejorar los rendimientos, para incrementar los ingresos de los productores.

Agradecimientos

Agradecemos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por el financiamiento de los proyectos “Indicadores de impacto ambiental de la agroindustria panelera” e “Indicadores de competitividad y sostenibilidad de modelos productivos regionales de la

agroindustria panelera colombiana", que sirvieron de base para este capítulo. En especial, agradecemos al profesor Jesús Hernán Camacho, de la Universidad Nacional de Colombia, por su participación en el componente de erosión de suelos, y a la profesora Carmen Alicia Parrado y la estudiante Vanesa Díaz Ríos, de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, por su participación en el componente de análisis de ciclo de vida. De igual manera, agradecemos al equipo de investigación de AGROSAVIA que participó en la captura de información en campo: Richard Sánchez, Víctor Pulido, Carlos González, Eduar Antolinez y Pablo Ramos.

Referencias

Castañeda, J. E., González, A. M., Usma, C. A., & Cano, N. A. (2017). Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, *6*(1), 107-122. https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.63316

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), & Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (2018). *Informe del proyecto "Indicadores de impacto ambiental de la agroindustria panelera"* [documento no publicado].

Da Silva, F. F., Souza, T. E. M. dos S., De Souza, E. R., Correa, M. M., & Rolim, M. M. (2019). Surface sealing and water erosion of soils with mulching in the semi-arid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *23*(4), 277-284. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n4p277-284

Freebairn, D. M., Loch, R. J., & Silburn, D. M. (1996). Soil erosion and soil conservation for vertisols. En N. Ahmad, & A. Mermut (Eds.), *Developments in soil science. Volume 24: Vertisols and technologies for their management* (pp. 303-362). Elsevier.

García, H. R., Peña, A. C., López, R. A., Durán, E., & Olvera, G. (2011). *Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1258/45216_61488.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Garraín, D. (2009). *Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida* [tesis de doctorado, Universitat Jaume I].

González Campaña, P. J., & Zúñiga Cabrera, D. C. (2022). Impactos ambientales en la producción de panela en la parroquia de Pacto del Distrito Metropolitano de Quito. *Esferas*, *3*, 94-111. https://doi.org/10.18272/esferas.v3i1.2430

Oliveira, A. H., Silva, M. L. N., Curi, N., Avanzi, J. C., Neto, G. K., & Araújo, E. F. (2013). Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. *Ciência e Agrotecnologia*, *37*(2), 159-169. https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000200007

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). *Evaluación del impacto ambiental. Directrices para los proyectos de campo de la FAO*. https://www.fao.org/3/i2802s/i2802s.pdf

Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *187*, 87-105. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010

Portela, J. C., Cogo, N. P., Filho, J. C. R., Sequinatto, L., Batista, R. O., Sousa, C. M. M., & Gondim, J. E. F. (2018). Nutrient losses due to water erosion using simulated rainfall in southern Brazil. DYNA, *85*(206), 236-241. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.71084

Quezada-Moreno, W. F., Quezada-Torres, W. D., Proaño-Molina, M., Mora-Gutiérrez, M., Viva-Vivas, M., Jiménez-Sánchez, A., González-Suárez, E., Molina-Borja, F., & Zambrano-Ochoa, Z. (2020). Evaluación del impacto ambiental en el proceso de elaboración de panela mediante el Análisis de Ciclo de Vida. *Afinidad*, *78*(592), 62-67. https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/385613

Ramos, J. C., Bertol, I., Bandeira, D. H., Barbosa, F. T., & Zangiski, F. (2019). Path coefficient analysis, a different approach to identify soil quality indicators. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *23*(7), 545-551. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p545-551

Rodríguez Borray, G. A., Huertas Carranza, B., Polo Murica, S. M., González Chavarro, C. F., Tauta Muñoz, J. L., Rodríguez Cortina, J., Ramírez Durán, J., Velásquez Ayala, F. A., Espitia González, J. J., & López Zarazá, R. A. (2020). *Modelo productivo de la caña de azúcar* (Saccharum officinarum) *para la producción de panela*

en Cundinamarca. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/35698/ver%20documento%2035698.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Rodríguez-Borray, G. A., Cruz-Castiblanco, G. N., Tauta-Muñoz, J. L., Huertas-Carranza, B., & Polo-Murcia, S. M. (2022). Diversidad de empresas agroindustriales rurales: tipologías de producción de panela en Huila, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, *33*(2), artículo 47969. https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47969

Roux, R. S., García, V. M., & Espuna, J. A. (2014). Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental. *Nova Scientia*, *7*(13), 243-266. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000100014

Sierra, D., Aristizábal, A. J., Hernández, J. A., & Ospina, D. (2019). Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia. *Energy Reports*, *6*(3), 10-19. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.012

Soler, J. P., & Gómez, F. H. (2004). *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimpa y plana-Cimpa en hornillas paneleras* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. https://docplayer.es/33971712-Determinacion-de-los-parametros-de-diseno-y-operacion-de-camaras-de-combustion-tipo-ward-cimpa-y-plana-cimpa-en-hornillas-paneleras.html

Tauta, J. L., Camacho-Tamayo, J. H., & Rodríguez, G. A. (2018). Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelera utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, *21*(2), 405-413. https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1074

Tauta-Muñoz, J. L., Camacho-Tamayo, J. H., Rodríguez-Borray, G. A., Sánchez-Jiménez, R. J., & Pulido-Blanco, V. C. (2023). Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en caña de azúcar para producción de panela. *Informador Técnico*, *87*(2), 3-15. https://doi.org/10.23850/22565035.5540

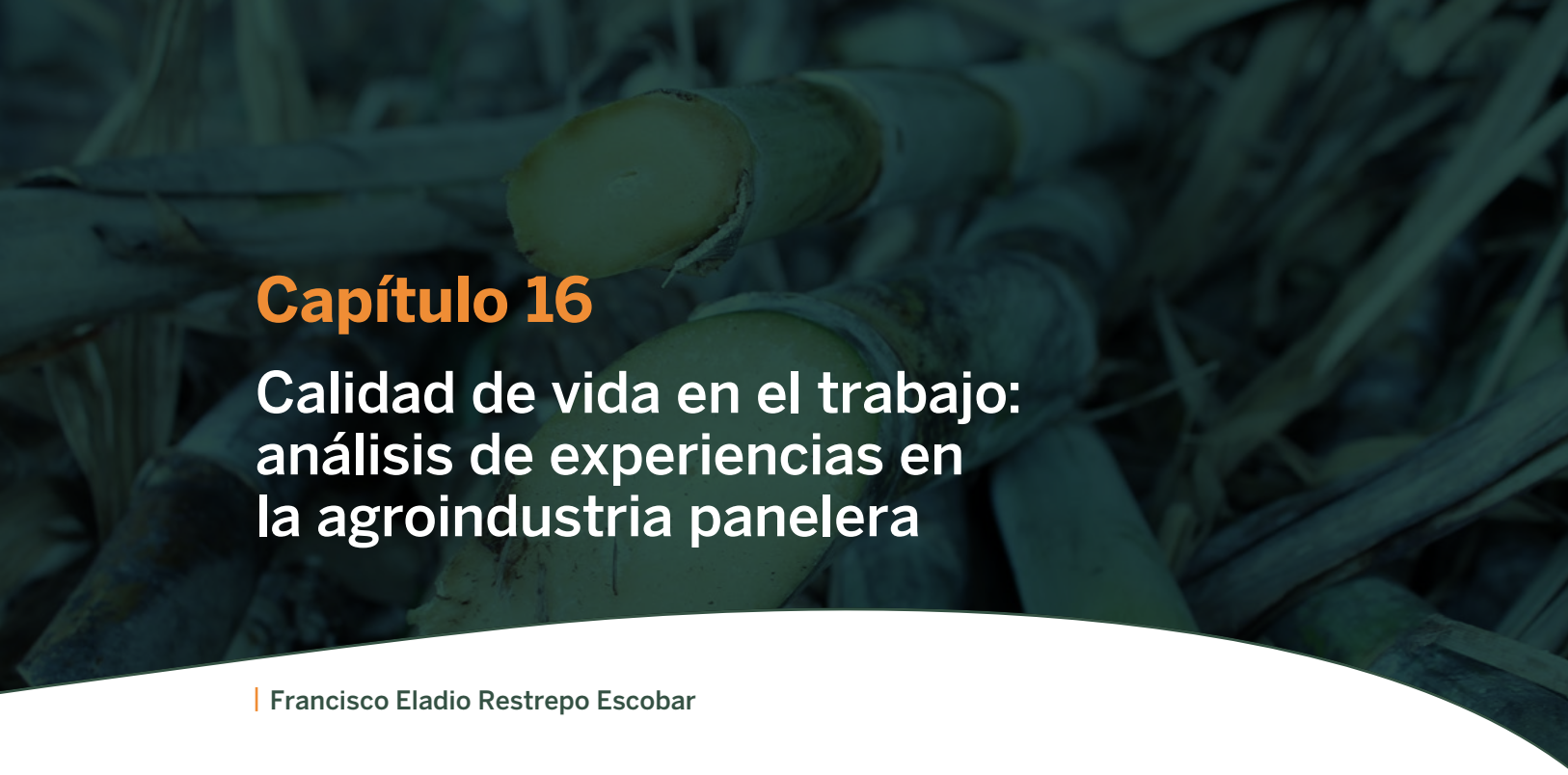
Teófilo-Salvador, E., Morales-Reyes, G. P., Muciño-Castañeda, R., & Esteller-Alberich, M. V. (2019). Experimentación reducida-controlada *in situ* del deslizamiento de suelo por efecto de flujo subsuperficial de agua. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *20*(3), 1-12. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.026

Vanwalleghem, T., Gómez, J. A., Infante, J., González, M., Vanderlinden, K., Guzmán, G., Laguna, A., & Giráldez, J. V. (2017). Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene*, *17*, 13-29. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002

Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O., & Wernet, G. (2013). *Overview and methodology. Data quality guideline for the Ecoinvent database version 3 (Ecoinvent Report 1)*. The Ecoinvent Centre. https://lca-net.com/files/Overview_and_methodology.pdf

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1960). An universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. En Soil Science Society (Ed.), *7th International Congress of Soil Sciences* (pp. 418-425).





Capítulo 16

Calidad de vida en el trabajo: análisis de experiencias en la agroindustria panelera

Francisco Eladio Restrepo Escobar

Resumen

La prevención de riesgos laborales para garantizar la integridad física y mental de los trabajadores se hace cada vez más visible e importante en la agroindustria panelera de Colombia. De esta manera, el concepto de *calidad de vida* toma un papel importante en la expectativa y la experiencia del trabajador, por lo que se trazó el objetivo de identificar las percepciones que tienen los trabajadores de la agroindustria panelera sobre su calidad de vida laboral. Este trabajo de investigación fue de carácter descriptivo, y se tomaron como categorías de análisis las siguientes dimensiones: *organización del trabajo*, *bienestar laboral*, *evolución laboral* y *efectos colaterales del trabajo*. La muestra estuvo constituida por 108 personas que se dedican a la producción de panela de manera formal en diferentes modalidades de contratación. En cuanto a los resultados, se encontró que, en general, los trabajadores se sienten satisfechos realizando las labores de producción; sin embargo, se evidenciaron algunos *efectos colaterales del trabajo* derivados de las exigencias en diversas actividades que generan cansancio físico, dolores de espalda y dificultad para dormir en las noches, síntomas que afectan no solo el proceso de producción, sino también la salud de las personas. Teniendo en cuenta lo anterior, se sientan las bases para futuras investigaciones sobre el trabajo decente en trapiches paneleros, lo cual

es trascendental para dignificar el trabajo de las personas y, por consiguiente, para generar competitividad en la agroindustria.

Palabras clave: organización del trabajo, sociología laboral, psicología ocupacional, bienestar laboral, satisfacción en el trabajo

Introducción

En Colombia se han producido cambios en la estructura del empleo, y el Estado se enfrenta a una constante insatisfacción por parte de los empleados por el incumplimiento de las políticas y normas relacionadas con seguridad y salud en el trabajo. Como consecuencia, en los últimos años los académicos han mostrado un especial interés por emprender estudios sobre el trabajo, para develar los impactos que la modernización laboral está generando en las experiencias y el bienestar de los trabajadores (Stecher, 2014). Por tal razón, se hace necesario profundizar en investigaciones que permitan obtener un mayor conocimiento y comprensión de los sucesos del mundo del trabajo en diferentes áreas y, en especial, en la agroindustria panelera. Así las cosas, un insumo importante para dichos estudios son las teorías del desarrollo, las cuales enfatizan en el progreso de las sociedades y en la búsqueda por alcanzar condiciones dignas para las poblaciones, demostrando que las capacidades de las personas son una materia prima para generar bienestar tanto económico como social (Battaglino, 2019).

La agroindustria de la panela ha venido generando, en promedio, alrededor de 236.392 empleos al año en Colombia (Rodríguez Borray et al., 2019), y es uno de los sectores tradicionales más importantes después del café, ya que de este depende el desarrollo económico y social en muchas regiones de Colombia. La panela, denominada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como azúcar de caña no centrifugada, se realiza en pequeñas explotaciones, mediante procesos artesanales en los que predominan el trabajo familiar y

métodos de producción bastante limitados incluso en los trapiches más tecnificados (Flórez Martínez, 2013). En esta actividad agroindustrial confluyen cultivadores de caña de azúcar para la producción de panela, procesadores, prestadores de servicios, trabajadores y comercializadores. Algunas características predominantes del empleo en este sector son el debilitamiento del bienestar social de los trabajadores, bajos salarios, condiciones de salud deplorables, escasa seguridad social, horarios de trabajo extensos, la ocupación en muchas tareas y la exposición a temperaturas extremas y a agroquímicos (Restrepo Escobar & Sánchez Caicedo, 2020).

Por su parte, la calidad de vida en el trabajo se refiere a los factores que intervienen entre el trabajo y las características del trabajador que repercuten en las experiencias de su labor cotidiana y su bienestar psicológico. Es la manera como los trabajadores perciben, sienten y experimentan la presencia de factores de riesgo, seguridad y satisfacción relacionados con el desempeño de su trabajo (González-Baltazar et al., 2010). En ese orden de ideas, la calidad de vida en el trabajo percibida por los trabajadores influye en la salud y la productividad del trabajador, impactando positiva o negativamente los resultados organizacionales (Vásquez-Jaramillo et al., 2018).

Con relación a las variables de calidad de vida laboral evaluadas en la investigación, en primer lugar tenemos la *organización del trabajo*. Esta variable está relacionada con los procesos que integran el talento humano con tecnologías, herramientas y materiales en los procesos productivos, a través de métodos y procedimientos para trabajar de forma razonada, armónica y sin contratiempos, con niveles adecuados de seguridad y salud, para lograr la máxima productividad, a fin de satisfacer las necesidades de los colaboradores y los requerimientos de la sociedad (Martínez et al., 2018). Los estudios de *organización del trabajo* apuntan a modificar las condiciones técnicas de los procesos por motivos de cambios en las condiciones de trabajo, en los insumos, en la tecnología, entre otros, para generar sistemas de remuneración

justos, afrontar riesgos en los procesos productivos e identificar posibles contingencias, a fin de aumentar la productividad y competitividad con la participación de los trabajadores (Zayas Sabatela, 2021).

Siguiendo con la definición de las variables, el *bienestar laboral* es el grado óptimo de satisfacción del trabajador; estudia y analiza la relación entre las personas y los espacios físicos que las circundan (Puello Alcocer et al., 2017). Se centra en los niveles de ingreso, el gasto social y la inversión de los individuos, condiciones objetivas y observables en una comunidad, el grado de implementación de servicios y prestaciones de que disponga la comunidad, la influencia de variables demográficas, el lugar de residencia o hábitat, junto con otras como el ocio, la familia o el trabajo (Mallard et al., 2017). De otro lado, también tiene que ver con el bienestar subjetivo o psicológico, que consiste en un conjunto de juicios valorativos y de reacciones emocionales concernientes al grado en que la propia experiencia es vivida como satisfactoria, agradable y positiva. Así las cosas, el *bienestar laboral* es consecuencia de situaciones organizacionales, y excepcionalmente es causa de situaciones personales (Fonseca Herrera & Cruz Torres, 2019).

En cuanto a la *evolución laboral*, se entiende como el desarrollo de capacidades y habilidades que generan autorrealización en el ser humano y le permiten satisfacer sus necesidades para establecer relaciones sociales (Feria Galbán, 2018). La *evolución laboral* está asociada a la forma como un individuo se percibe a sí mismo en la ejecución de múltiples funciones en el ámbito laboral y, como se verá más adelante, en el ejercicio de diferentes roles en contextos de trabajo más complejos, que le permitirán trascender profesionalmente para satisfacer sus necesidades económicas y socioafectivas. Esto es muy importante en contextos laborales, puesto que el trabajo vincula a las personas con las organizaciones y con actividades laborales, lo cual trae como consecuencia que los trabajadores se sientan partícipes de una organización y de una categoría social relacionada con su actividad de trabajo (Moreno-Hurtado et al., 2018). En el interior de una empresa, es

una práctica que motiva al personal a permanecer en ella y que le permite transitar un camino desde el puesto actual hacia otros de mayor categoría y responsabilidad. Por lo tanto, el objetivo es ampliar, desarrollar y perfeccionar al trabajador para el crecimiento profesional y personal o para estimular su eficiencia y productividad en el cargo que realiza (Nieves Zubillaga, 2013). En definitiva, la *evolución laboral* está relacionada con el desarrollo de competencias que, junto con la motivación intrínseca y extrínseca, le permiten al individuo adaptarse a cualquier entorno organizacional y desempeñarse de manera excepcional para acceder a oportunidades de promoción laboral, lo que configura una sensación de seguridad y satisfacción con el empleo.

En cuanto a los *efectos colaterales del trabajo*, estos son el resultado de las condiciones relacionadas con los procesos y las tareas del ambiente laboral que afectan la salud física y psicológica de las personas y que se transfieren a los ámbitos familiar y social. Algunos de estos efectos son la saturación mental, la continuación de tareas laborales en casa, el desgaste emocional, el trato despersonalizado a compañeros, el cansancio físico, dolores en el cuerpo, la automedicación, entre otros (Restrepo Escobar & Sánchez Caicedo, 2020). En los entornos laborales, los riesgos psicosociales han ido aumentando ostensiblemente, y están relacionados con el trabajo precario (bajos salarios, jornadas de trabajo extensas, contratación por horas, labores o unidades producidas, etc.). Todo lo anterior afecta de manera significativa la salud y el bienestar de los trabajadores (Díaz Pincheira & Carrasco Garcés, 2018). Por tanto, si se lograran equilibrar los factores y las condiciones laborales, aumentarían la confianza en sí mismo y la motivación, al tiempo que se incrementarían la capacidad de trabajo y el bienestar del empleado (Benavides et al., 2016; Sabastizagal-Vela et al., 2020).

Finalmente, tras rastrear diversos proyectos y resultados académicos en torno al tema, se evidencia que poco han sido estudiados los factores sobre la organización, el bienestar, la evolución y los efectos negativos asociados al trabajo en el sector agropecuario,

y en especial en la agroindustria de la panela, un producto que se ha vuelto muy apetecido en los países europeos por ser un alimento natural y saludable.

Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue analizar las experiencias de trabajo de las personas que se dedican a la producción de panela, teniendo en cuenta las dimensiones de *organización del trabajo*, *bienestar laboral*, *evolución laboral* y *efectos colaterales del trabajo*, y sentar las bases para futuros modelos de gestión de calidad de la vida laboral en esta agroindustria, que genera alrededor de 40.895.880 jornales y 236.392 puestos de trabajo al año en Colombia (Rodríguez Borray et al., 2019).

Metodología

La investigación fue descriptiva, con un diseño cuantitativo de corte transversal, y se realizó un muestreo a conveniencia intencionada (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Para ello, se contó con dos muestras: una de 91 trabajadores, distribuidos en ocho unidades productivas del municipio de Yolombó, Antioquia, y otra de 17 trabajadores, distribuidos en tres unidades productivas del municipio de San Roque, Antioquia. El instrumento utilizado para la recolección de información fue una encuesta compuesta por 37 ítems, medida con la escala de Likert, constituida por cuatro dimensiones: *organización del trabajo* (6 ítems), *bienestar laboral* (10 ítems), *evolución laboral* (8 ítems) y *efectos colaterales del trabajo* (13 ítems). Además, se realizaron comparaciones entre grupos por género. El análisis de los datos fue realizado con el *software* estadístico SPSS v20. Para efectos de validez y confiabilidad del cuestionario, se encontró una correlación estadísticamente significativa, una alta confiabilidad y una consistencia interna en el cuestionario aplicado a través de los criterios de correlación ítem-test (Pearson) y confiabilidad (alfa de Cronbach). Se consideró una correlación superior a 0,30 y significatividad de la correlación si esta se encontraba entre 0,000 y 0,005. Los resultados que

arrojó el alfa de Cronbach indicaron una baja variabilidad, lo cual da cuenta de una alta confiabilidad. Finalmente, se contrastó la información obtenida con los referentes teóricos, a fin de generar nuevos aportes al conocimiento.

Resultados y discusión

Para dar más claridad a los resultados, en la tabla 16.1 se presentan los datos sociodemográficos de la muestra analizada.

Tabla 16.1. Datos sociodemográficos

Variable	Ítems	Frecuencia	Porcentaje
Sexo	Hombre	68	63
	Mujer	40	37
Edad	18-25	26	24,1
	26-30	16	14,8
	31-35	20	18,5
	36-40	16	14,8
	41-50	22	20,4
	Más de 50	8	7,4
Nivel de formación alcanzado	No sabe leer	10	9,3
	Primaria	52	48,1
	Bachillerato	38	35,2
	Técnico	7	6,5
	Profesional	1	0,9
Antigüedad en el oficio	Menos de 1 año	22	20,4
	1-5 años	55	50,9
	5-10 años	11	10,2
	10-15 años	5	4,6
	Más de 15 años	15	13,9

Continúa

Continuación tabla 16.1

Variable	Ítems	Frecuencia	Porcentaje
Duración de la jornada laboral	8 horas	9	8,3
	10 horas	11	10,2
	12 horas	36	33,3
	14 horas	30	27,8
	16 horas	20	18,5
	Otra	2	1,9
Modalidad de contrato	Término indefinido	33	30,8
	Término fijo	5	4,7
	Unidades producidas	9	8,4
	Jornal	57	53,3
	Otro	3	2,8

Fuente: Elaboración propia

Organización del trabajo

Con relación a esta variable, se les indicó a los trabajadores lo siguiente: "Valore los siguientes aspectos de las condiciones de trabajo" (tabla 16.2). Las puntuaciones más bajas se encontraron en los ítems "el trabajo me genera estrés" y "aporta a mis necesidades". En ambos ítems, la desviación típica es alta, lo cual indica que hay una alta dispersión en los datos; es decir, el promedio en estos casos no representa al grupo encuestado. En términos generales, con relación a la organización del trabajo, las medias cercanas a 7 indican que los trabajadores están muy satisfechos, y las medias cercanas a 4-5 indican un grado de satisfacción menor con la organización del trabajo en las unidades productivas objeto de estudio. Las demás variables (bienestar laboral, evolución laboral y efectos colaterales del trabajo) presentaron puntuaciones altas y desviaciones típicas por debajo de 1,26; es decir, hay homogeneidad en las respuestas, y estas representan a todo el grupo de personas objeto de estudio.

Tabla 16.2. Aportes de la organización del trabajo a la satisfacción de los trabajadores

Ítem	Media	Desviación típica
Aporta a mis necesidades	5,53	1,81
Me motiva a trabajar	6,36	1,16
Me ayuda a crecer como persona	6,23	1,26
Me hace sentir útil	6,56	1,02
Me hace estar comprometido	6,49	1,16
El trabajo me genera estrés	4,03	2,13

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que las condiciones de trabajo de los empleados son medianamente óptimas, y, desde una perspectiva objetiva, se puede afirmar que la organización del trabajo afecta positivamente a los trabajadores, genera buen trato entre compañeros, estimula la autoestima y el crecimiento personal, hace que las personas estén felices y no se sientan discriminadas, y genera un buen ambiente de trabajo.

Bienestar laboral

Con relación a esta variable, a los encuestados se les preguntó lo siguiente: "Mi actual experiencia del trabajo está relacionada con actitudes de..." (tabla 16.3).

Tabla 16.3. Caracterización del bienestar laboral

Ítem	Media	Desviación típica
Disgusto-gusto	6,27	1,12
Inseguridad-seguridad	6,12	1,35
Intranquilidad-tranquilidad	6,40	1,09
Estar mal-estar bien	6,51	0,96
Desconfianza-confianza	6,50	1,08

Continúa

Continuación tabla 16.3

Ítem	Media	Desviación típica
Intolerancia-tolerancia	6,31	1,12
Confusión-claridad	6,58	0,69
Desesperanza-esperanza	6,42	1,15
Fracaso-éxito	6,39	1,16
Dificultad-facilidad	5,07	2,14

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que el bienestar laboral, en términos generales, fue evaluado positivamente; es decir, los empleados se sienten a gusto, seguros, tranquilos y confiados con relación a su experiencia en el trabajo, lo cual les da una sensación de bienestar. Sin embargo, es importante resaltar que para el 95 % de la población encuestada su trabajo es difícil, por cuanto exige grandes esfuerzos físicos y se está expuesto a diversos riesgos en el corte y transporte de la caña de azúcar al lugar de procesamiento, pues en algunos casos se hace cargándola en el hombro. La molienda y la cocción implican altos riesgos de patologías lumbares y de accidentes por amputaciones o quemaduras, puesto que los procesos deben ser continuos, incluso en horarios nocturnos, y por la incipiente tecnificación del proceso y el escaso conocimiento sobre normas de seguridad y salud (Ministerio del Trabajo, 2019); además, no hay programas de prevención y mucho menos medidas para mitigar o aliviar el desgaste, lo cual puede generar efectos negativos e irreversibles en la salud de los trabajadores. Entre los factores que más inciden positivamente en el bienestar laboral, está la seguridad y confianza con el trabajo, pues los trabajadores, desde su ámbito laboral, se sienten tranquilos de tener un ingreso fijo, lo cual es muy significativo si se tienen en cuenta las oportunidades que ofrece su entorno. Asimismo, se refleja la falta de oportunidades para los jóvenes (18-25 años), que en la muestra representan el 24,1 % de los trabajadores y no tienen acceso a la educación, lo que genera riesgos psicosociales en esta población, pues expresan no sentir éxito en su vida y creen no haber evolucionado laboralmente dentro de la organización.

Evolución laboral

En esta variable, los encuestados completaron cada ítem usando una escala de 1 ("está bajando") a 7 ("está subiendo") (tabla 16.4).

Tabla 16.4. Evolución laboral de los trabajadores en los últimos años

Ítem	Media	Desviación típica
Mi motivación por el trabajo	5,47	1,58
Mi identificación con los valores de mi trabajo	6,03	1,32
Mi capacidad para realizar el trabajo	6,39	1,03
Mi rendimiento en el puesto de trabajo	6,39	0,91
Mi autoestima personal	6,18	1,29
Mi estado de ánimo en el trabajo	5,98	1,37
La amabilidad de mis compañeros de trabajo	6,19	1,22
El acatamiento de las normas del trabajo	6,55	0,80

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que, en términos generales, los trabajadores de los trapiches sienten que su capacidad para trabajar, su rendimiento, su autoestima y el acatamiento de las normas están en ascenso, así como la motivación y el estado de ánimo, pero en un menor grado. Sin embargo, el 85 % expresaron que, aunque su rendimiento y capacidad para realizar las labores ha aumentado, no ven en esta labor una gran oportunidad de desarrollo personal. Algunas observaciones que realizaron los entrevistados fueron las siguientes:

- "Este trabajo lo tengo de paso; no me veo en el futuro haciendo esto".
- "Mi relación con los jefes es regular".
- "El trabajo significa pobreza y castigo".

Estas afirmaciones contribuyen a explicar lo que sucede en la agroindustria panelera: por la inestabilidad en los precios del producto, no se generan márgenes de ganancia suficientes para que los productores ofrezcan a los trabajadores mejores condiciones de trabajo, garantías prestacionales, beneficios sociales, seguridad, salud y, en general, calidad de vida. Dadas las circunstancias, se puede justificar que los trabajadores que se dedican a esta labor difícilmente aspiren a una pensión o a tener una expectativa de vida que implique progreso económico y desarrollo personal sostenible en el tiempo. Lo anterior termina reforzando el bajo nivel de protección social que tradicionalmente ha caracterizado al empleo rural (Villota Ortega & Chamorro Martínez, 2020).

Efectos colaterales del trabajo

En cuanto a esta variable, a los trabajadores se les dio la siguiente instrucción: "Indique la frecuencia con que su trabajo le ocasiona los siguientes efectos", usando una escala de 1 ("nunca") a 7 ("siempre") (tabla 16.5). Se encontró que, en términos generales, la mayoría de los empleados no sienten que el trabajo afecte su estado de ánimo o sus relaciones familiares. Sin embargo, se evidenció que los silleros, prenseros, templadores, tolincheros, empacadores y hornilleros padecen cansancio físico, dolores de espalda, dolores musculares y dificultad para dormir en las noches. En general, la única motivación por el trabajo es que este les brinda un ingreso económico para subsistir. Cabe resaltar que en esta variable las desviaciones típicas son altas, lo cual indica que las respuestas son heterogéneas; es decir, la media no representa a todo el grupo encuestado, pues algunos tienen percepciones positivas, y otros, negativas. En general, las actividades en los trapiches exigen a todos los trabajadores posiciones que afectan la columna vertebral, movimientos repetitivos, un manejo de cargas pesadas e incluso trabajar muchas horas de pie, además de que no hay sitios de descanso ni un comedor adecuado. Las consecuencias psicológicas son emocionales, cognitivas y conductuales, lo que genera estrés. Las consecuencias del estrés pueden originar enfermedades

fisiológicas que afectan el bienestar y la calidad de vida de quien lo padece y a su vez pueden afectar el grupo familiar.

Tabla 16.5. Efectos colaterales del trabajo

Ítem	Media	Desviación típica
Sigue pensando en el trabajo cuando está en casa	3,56	2,25
El trabajo afecta las relaciones con su familia	2,30	1,99
Si tiene problemas en el trabajo, se desquita con otros	1,50	1,21
Siente que tiene más trabajo en muy poco tiempo	2,96	2,15
Su trabajo hace que cambie su estado de ánimo	3,14	2,11
Siente cansancio físico	5,16	1,85
Siente fatiga mental	2,98	2,15
Tiene mal humor	2,42	1,87
Siente dolores de estómago	2,07	1,74
Siente dolores de cabeza	3,32	2,11
No duerme en las noches	5,81	1,80
Siente dolores de espalda	6,52	2,29
Siente dolores musculares	5,68	2,28

Fuente: Elaboración propia

Comparación por género

En la tabla 16.6 se muestran los resultados de la comparación por género. En cuanto a la dimensión de organización en el trabajo, las mujeres tienden a tener más percepciones positivas que los hombres. Un aspecto importante fue visualizar la tendencia positiva de las mujeres frente a su trabajo; ellas se sienten realizadas y positivas frente a lo que hacen, pues el trabajo significa para ellas independencia, capacidad para sostener a

una familia por sí mismas, desarrollo personal en el ámbito en el que viven, así como la oportunidad de generar conciencia sobre la importancia de la mujer en el campo. La percepción positiva de las mujeres se evidencia, igualmente, en el bienestar laboral, la evolución laboral y los efectos colaterales del trabajo. Sin embargo, es importante aclarar que, en las producciones objeto de estudio, las mujeres realizan únicamente labores de empacado, es decir, no están expuestas a todos los riesgos, de ahí que su percepción frente a las condiciones de trabajo sea más positiva que la de los hombres.

Tabla 16.6. Análisis comparativo entre las respuestas dadas por hombres y mujeres a las diferentes variables

Variable	Sexo	Muestra	Media	Desviación típica	Error típico de la media
Organización en el trabajo	Hombre	68	5,76	0,80	0,10
	Mujer	40	5,91	0,69	0,11
Bienestar laboral	Hombre	68	6,22	0,68	0,08
	Mujer	40	6,32	0,64	0,10
Evolución laboral	Hombre	68	6,11	0,75	0,09
	Mujer	40	6,19	0,85	0,13
Efectos colaterales del trabajo	Hombre	68	3,39	0,96	0,12
	Mujer	40	3,67	0,91	0,14

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Las actividades que se realizan en la agroindustria panelera tienen muchos requerimientos de mano de obra, demandan mucho esfuerzo físico, y los trabajadores están expuestos a riesgos tanto físicos como psicosociales que afectan su calidad de vida. Por tal razón, y teniendo presentes los resultados de la investigación, es fundamental la intervención del Estado mediante políticas públicas

que fomenten y fortalezcan las prácticas de gestión humana en este sector. En tal sentido, se requiere diseñar, por parte de las autoridades laborales, procedimientos para inspeccionar de manera permanente los procesos de producción, fomentar ambientes de trabajo saludables y velar por que los productores implementen de manera decidida programas de seguridad y salud en el trabajo.

La importancia de los resultados de la investigación radica en que la agroindustria panelera es una fuente de empleo para miles de personas, y si bien se han realizado diversos estudios de índole técnico relacionados con la productividad y la comercialización, no se ha profundizado en estudios del trabajo que apunten a mejorar las condiciones de vida de las personas que hacen posible la elaboración de este producto, indispensable en la canasta familiar de miles de hogares en Colombia.

Con el estudio realizado se sientan las bases para futuras investigaciones sobre el trabajo decente en trapiches paneleros, lo cual es trascendental para dignificar la labor de las personas y, por consiguiente, para generar competitividad en la agroindustria.

Agradecimientos

La presente investigación se deriva del "Estudio sobre la calidad de vida en el trabajo en unidades agrícolas y agroindustriales dedicadas a la producción de panela en los municipios de Yolombó y San Roque", financiado por la institución universitaria Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. El autor expresa un especial agradecimiento a la Asociación de Paneleros y Agropecuarios de Yolombó por su colaboración para conseguir los espacios y el contacto con la población participante en el estudio.

Referencias

Battaglino, L. (2019). El desarrollo humano como libertad: una aproximación a la propuesta del enfoque de las capacidades de Amartya Sen. *Aporía: Revista Internacional de Investigaciones Filosóficas*, (16), 4-21. https://doi.org/10.7764/aporia.16.673

Benavides, F. G., Merino-Salazar, P., Cornelio, C., Assunção, A. A., Agudelo-Suárez, A. A., Amable, M., Artazcoz, L., Astete, J., Barraza, D., Berhó, F., Milián, L. C., Delclòs, G., Funcasta, L., Gerke, J., Gimeno, D., Itatí-Iñiguez, M. J., Lima, E. de P., Martínez-Iñigo, D., De Medeiros, A. M., ... Vives, A. (2016). Cuestionario básico y criterios metodológicos para las Encuestas sobre Condiciones de Trabajo, Empleo y Salud en América Latina y el Caribe. *Cadernos de Saúde Pública*, *32*(9), artículo e00210715. https://www.scielo.br/j/csp/a/PrLx66CQ7N4tLtgB6LVbLyq/?format=pdf&lang=es

Díaz Pincheira, F. J., & Carrasco Garcés, M. E. (2018). Efectos del clima organizacional y los riesgos psicosociales sobre la felicidad en el trabajo. *Contaduría y Administración*, *63*(4), 1-14. https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2018.1142

Feria Galbán, K. K. (2018). Los riesgos psicosociales en el trabajo: un reto colectivo en el desarrollo laboral cubano. *Lex Social: Revista de Derechos Sociales*, *8*(1), 174-205. https://upo.es/revistas/index.php/lex_social/article/view/292

Flórez Martínez, D. H. (2013). Agenda prospectiva de investigación de la cadena productiva de la panela y su agroindustria. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, *17*(36), 72-86. http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v17n36/v17n36a07.pdf

Fonseca Herrera, J. M. G., & Cruz Torres, C. E. (2019). Relación del bienestar subjetivo de los trabajadores con su compromiso hacia la organización. *CES Psicología*, *12*(2), 126-140. ttps://doi.org/10.21615/cesp.12.2.9

González-Baltazar, R., Hidalgo-Santacruz, G., Salazar, J. G., & Preciado-Serrano, M. L. (2010). Elaboración y validez del instrumento para medir calidad de vida en el trabajo "CVT-GOHISALO". *Ciencia & Trabajo*, *12*(36), 332-340.https://www.academia.edu/36324477/Elaboraci%C3%B3n_y_Validez_Del_Instrumento_Para_Medir_Calidad_De_Vida_en_El_Trabajo_CVT_Gohisalo?from=cover_page

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Interamericana.

Mallard, A. G. C., Lance, C. E., & Michalos, A. C. (2017). Culture as a moderator of overall life satisfaction—Life facet satisfaction relationships. En A. C. Michalos, *Connecting the Quality of Life theory to health, well-being and education. The selected works of Alex C. Michalos* (pp. 59-79). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-51161-0_3

Martínez, A. A., García Fenton, V., & Fleitas Triana, S. (2018). Análisis de la organización del trabajo en la agrupación de torreros de la empresa de telecomunicaciones. *Revista de Ciencia y Tecnología*, *29*(1), 4-12. https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/207

Ministerio del Trabajo. (2019, 13 de febrero). Resolución 0312 de 2019. Por la cual se definen los Estándares Mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf

Moreno-Hurtado, M. A., Torres-Arévalo, N., Martínez-Patiño, K. V., Martínez-Beltrán, K. G., & Vesga-Rodríguez, J. J. (2018). Identidad laboral: análisis del concepto en el contexto actual del mundo del trabajo. *Salud y Administración*, *5*(14), 59-67. https://revista.unsis.edu.mx/index.php/saludyadmon/article/view/24/20

Nieves Zubillaga, I. C. (2013). Desarrollo profesional y puesto de trabajo. *Observatorio Laboral Revista Venezolana*, *6*(11), 111-137. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=219030140007

Puello Alcocer, E., Ramos, J., & Madariaga, C. (2017). Condiciones laborales de los trabajadores agrícolas del municipio de Montería, Colombia. *Temas Agrarios*, *17*(1), 20-31. https://doi.org/10.21897/rta.v17i1.693

Restrepo Escobar, F. E., & Sánchez Caicedo, Y. J. (2020). Calidad de vida en el trabajo en empresas agroindustriales dedicadas a producción de panela. *Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato*, *1*(2), 31-46. http://reiagro.ugto.mx/images/pdf/vol2/2/Numero-2.pdf#page=34

Rodríguez Borray, G. A., Polo Murcia, S. M., Riveros, M. Á., & Buitrago Ardila, A. M. (2019). *La agroindustria panelera impulsando el desarrollo rural en Colombia: un diagnóstico de la cadena productiva*. Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). http://hdl.handle.net/20.500.12324/36696

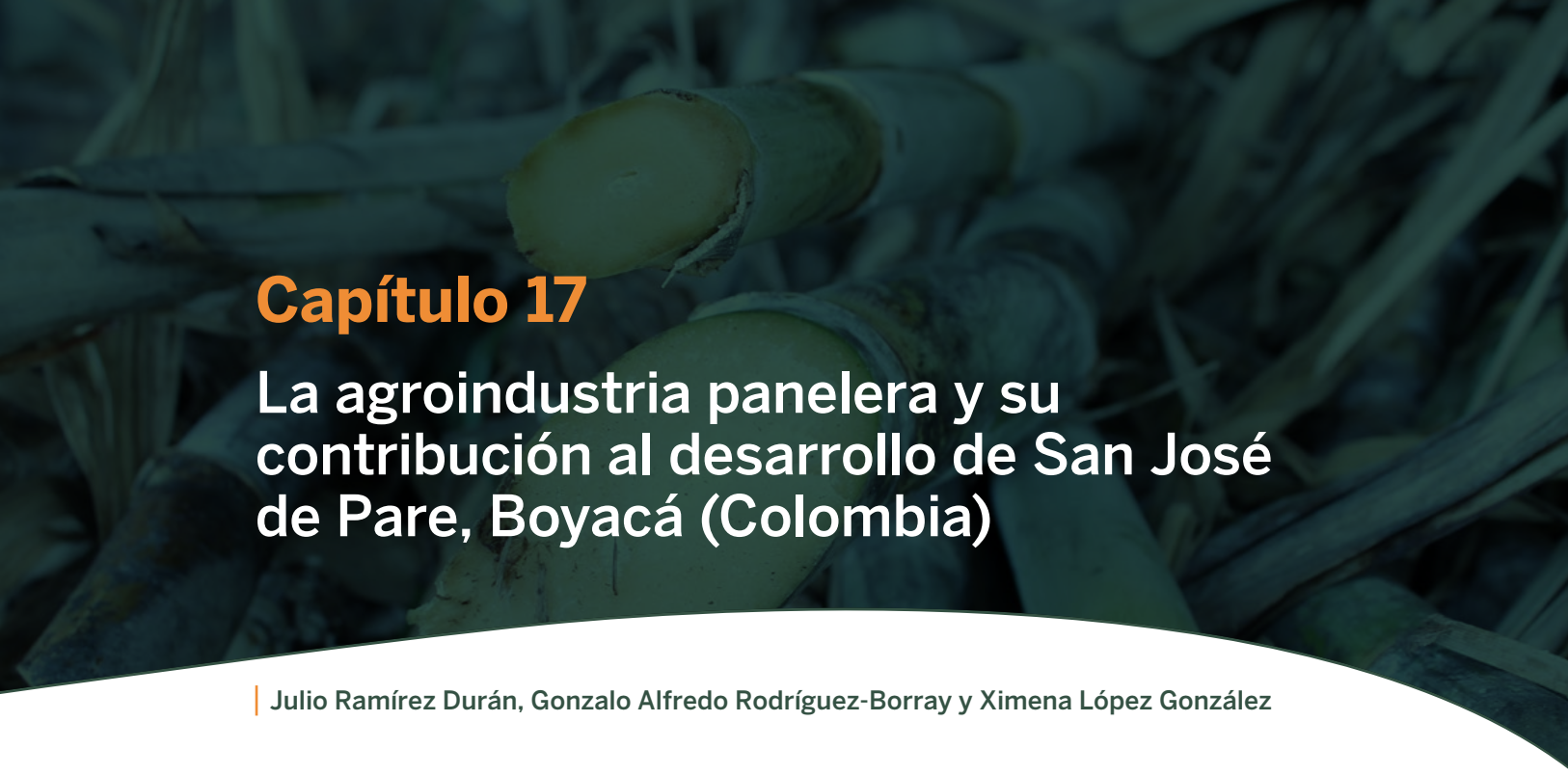
Sabastizagal-Vela, I., Astete-Cornejo, J., & Benavides, F. G. (2020). Condiciones de trabajo, seguridad y salud en la población económicamente activa y ocupada en áreas urbanas del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *37*(1), 32-41. https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.371.4592

Stecher, A. (2014). Fairclough y el lenguaje en el Nuevo Capitalismo: análisis de las dimensiones discursivas del mundo del trabajo. *Psicoperspectivas. Individuo y Sociedad*, *13*(3), 19-29. http://dx.doi.org/10.5027/psicoperspectivas-Vol13-Issue3-fulltext-526

Vásquez-Jaramillo, C., Barrios, D., & Cerón-Muñoz, M. F. (2018). Estudio exploratorio de la calidad de vida en el trabajo de ordeñadores de sistemas de producción de leche. *Archivos de Zootecnia*, *67*(258), 228-233. https://doi.org/10.21071/az.v67i258.3658

Villota Ortega, D. G., & Chamorro Martínez, G. (2020). *Estrategias para el control y mejoramiento de los procesos de producción en la industria panelera del municipio de Consacá (Nariño)*. Universidad Cesmag. http://repositorio.unicesmag.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/120

Zayas Sabatela, M. de J. (2021). Procedimiento para el estudio de la organización del trabajo en un proceso productivo. *Cofin Habana*, *15*(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612021000200005



Capítulo 17

La agroindustria panelera y su contribución al desarrollo de San José de Pare, Boyacá (Colombia)

Julio Ramírez Durán, Gonzalo Alfredo Rodríguez-Borray y Ximena López González

Resumen

El presente estudio pretende identificar los factores sociales, culturales y económicos del sistema de producción de panela y su contribución al desarrollo territorial en el municipio de San José de Pare (Boyacá), mediante el análisis de la implementación de la Resolución 779 del Ministerio de la Protección Social de 2006 (Ministerio de la Protección Social, 2006). La información se recolectó a partir de dos instrumentos: 1) una encuesta de caracterización de unidades productivas que emplea Fedepanela, la cual abarcó los componentes de cultivo e infraestructura, aplicada a la totalidad de los trapiches del municipio (71), y 2) un instrumento que abordó los componentes socioeconómicos y culturales, aplicado a diez trapiches seleccionados (tanto adecuados como no adecuados, según el cumplimiento de la normatividad). Se determinó que solamente el 20 % de los trapiches podían ser considerados como unidades productoras de alimentos adecuadas al cumplimiento normativo. La información recolectada es de utilidad para ajustar líneas de investigación, estrategias de transferencia de tecnología, programas de asistencia técnica y políticas relacionadas con el sector panelero de Colombia.

Palabras clave: reconversión tecnológica, Resolución 779, resistencia al cambio, trapiche

Introducción

Colombia presenta cifras interesantes sobre la agroindustria panelera: ocupa el primer lugar en consumo per cápita, con 25,7 kg/persona/año (Fedepanela, 2020), y es el segundo mayor productor de panela en el mundo, después de la India. Por su parte, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, 2018) estimó que esta industria genera cada año aproximadamente 287.000 empleos directos, y además, para 2014, contaba con 249.494 ha establecidas en caña de azúcar para la producción de panela (Ovalle Muñoz, 2014). Con relación a la capacidad de las unidades productoras de panela, o trapiches, Fedepanela (citada por Vásquez Chaves, 2019) resalta que el 83 % son pequeñas (< 100 kg/h), el 15 % son medianas (150-250 kg/ha) y el 2 % son grandes (> 250 kg/h).

Es de resaltar que a partir de 2004 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) considera a la panela como un alimento (Rodriguez et al., 2004), y es debido a esta categorización y al consumo per cápita que el antiguo Ministerio de la Protección Social emitió la Resolución 779 de 2006, en la que estableció el reglamento técnico y los requisitos sanitarios que deben cumplirse en la producción y comercialización de la panela para consumo humano (Ministerio de la Protección Social, 2006).

Se considera que la producción de panela en el departamento de Boyacá es semiindustrializada debido a las grandes áreas sembradas en caña de azúcar para panela y los altos volúmenes de producción alcanzados (Rodríguez Borray, 2005); Fedepanela (s. f.-a) reporta que el departamento cuenta con 15.924 ha de caña establecidas, con una producción de 138.053 t de panela anuales y un rendimiento de panela promedio de 9.782 t/ha.

Continuando con la importancia del sector panelero, especialmente en San José de Pare, uno de los municipios de mayor tradición panelera en Boyacá, se calcula que la producción de panela puede ser valorada en más de COP 37.890 millones cada año, y aunque

su comercialización se realiza principalmente en el mercado del municipio de Santana (Boyacá), la importancia socioeconómica que representa esta agroindustria en la dinámica de la población es indudable, pues con cada hectárea de cultivo de caña de azúcar y su posterior transformación a panela se vinculan en promedio 306 jornales, que representan más de 771.000 jornales anuales. Sin embargo, a pesar de que esta agroindustria es el principal renglón económico del municipio y su soporte permanente para el desarrollo, datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2012) pusieron en evidencia que el impacto no ha sido el esperado en las últimas décadas, puesto que el 44,83 % de la población de San José de Pare presentó necesidades básicas insatisfechas. Este valor es bastante alto si se compara con los promedios del departamento de Boyacá y del total del país, que fueron del 30,8 y el 27,8 %, respectivamente. Se resalta también que, a pesar de la vocación y tradición panelera del municipio, los niveles de adecuación de los trapiches existentes son claramente discutibles en función de la Resolución 779 de 2006.

En este sentido, el propósito del estudio fue identificar los factores sociales, culturales y económicos de la agroindustria panelera y su contribución al desarrollo territorial del municipio de San José de Pare (Boyacá), mediante el análisis de la implementación de la Resolución 779 de 2006 del Ministerio de la Protección Social (2006). Se espera que con los resultados obtenidos se logre el direccionamiento de iniciativas para la reconversión tecnológica enfocada a la adecuación de los trapiches, con los cuales se obtenga una producción de panela que cumpla con los estándares de calidad, así como para ajustar líneas de investigación, estrategias de transferencia de tecnología, programas de asistencia técnica y políticas relacionadas con el sector panelero de Colombia.

Metodología

La investigación fue desarrollada en San José de Pare, ubicado al nororiente del departamento de Boyacá, en la provincia de

Ricaurte, a 217 km de Bogotá por la ruta a Bucaramanga y a 84 km de Tunja, capital del departamento. La superficie del municipio, según el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), es de 73,85 km^2, de los cuales 0,23 km^2 corresponden al área urbana y 73,62 km^2 al área rural. El casco urbano se encuentra a 1.545 m s. n. m., en las coordenadas 5° 54′ 4″ de latitud norte y 73° 33′ 0″ de longitud oeste del meridiano de Greenwich (Alcaldía Municipal San José de Pare Boyacá, 2020).

El trabajo consistió en realizar un ejercicio de aproximación con las 71 unidades productoras de panela localizadas en San José de Pare durante el periodo 2013-2014, para entender sus dinámicas bajo las dimensiones sociales, económicas, culturales y técnicas que se desarrollan en torno a la actividad productiva de la panela. Para ello, se emplearon dos encuestas con enfoques mixtos cualitativos, cuantitativos y descriptivos. Los componentes de cultivo e infraestructura fueron abordados a través de la encuesta de caracterización de unidades productivas que emplea Fedepanela en su programa de asistencia técnica, instrumento aplicado por los técnicos de la Federación a la totalidad de los trapiches de San José de Pare. La encuesta estuvo integrada por las siguientes partes:

1. Información general: datos del productor (servicio de salud, nivel académico, información familiar) e información de infraestructura del trapiche y de la vivienda (se determina la existencia de la unidad productora, se determina si es particular o comunitario y se aborda el acceso a servicios públicos).
2. Cultivo de caña: ubicación, área de caña, variedades, edad del cultivo, producción, plagas, uso de parasitoides para control de plagas, enfermedades, fertilización y sistema de corte predominante.
3. Proceso e infraestructura: días de corte y molienda, capacidad de molienda (kg/h), tipo de motor, hornilla, tanque de jugos, paredes, pailas, cuarto de moldeo, área de almacenamiento, presentación de la panela, material del embalaje del producto final, comercialización y clientes.

4. Existencia de otros cultivos comerciales en la unidad productiva: ubicación, rendimiento, precio de venta y comercialización.

Con la información recolectada, se procedió a realizar la clasificación de los trapiches en las categorías "adecuado" y "sin adecuar". Para ello, se utilizaron los requisitos de la Resolución 779 de 2006 en cuanto a la infraestructura. Se tomaron seis variables determinantes para categorizar un trapiche como adecuado o sin adecuar: separación entre áreas de producción, pisos en superficie lavable y no porosa, existencia de área sanitaria, señalización en cada área, existencia de lavamanos en las áreas de trabajo y existencia de áreas de alimentación y descanso separadas del área de pailas o tren de molienda y cocción.

La segunda fase de recolección de información, para los componentes socioeconómico y cultural, se realizó a través de una encuesta semiestructurada aplicada a una muestra de cada una de las categorías, definiendo un tamaño de cinco trapiches seleccionados de las dos categorías debido la imposibilidad de contar con una población mayor en la categoría de "adecuado" y a la dificultad para que los propietarios compartieran la información de costos de producción de su unidad. El instrumento estaba compuesto por las siguientes dimensiones:

1. Dimensión social: nivel de educación del propietario y sus hijos, lugar de residencia, tiempo de trabajo en la agroindustria panelera y motivos para vivir en el municipio.
2. Dimensión cultural: forma de adquisición del trapiche, tiempo de adquisición (en años), dependencia productiva de la actividad panelera, principales cambios del municipio, aporte individual al municipio y participación en programas del Gobierno (asistencia técnica e investigación).
3. Dimensión técnico-económica: motivación para la adecuación del trapiche, elementos necesarios para su adecuación, valor del trapiche, lugar de comercialización, costos de producción y beneficios recibidos por trabajar en esta agroindustria. Para

el cálculo de los costos de producción, se contemplaron los componentes de cultivo, proceso y comercialización.

Resultados y discusión

Categorización de los trapiches paneleros del municipio

De la totalidad de los trapiches de San José de Pare (71 unidades), solo 14 de ellos (20 %) presentaron en su infraestructura el cumplimiento de los parámetros requeridos por la Resolución 779 de 2006, por lo que se clasificaron como unidades productivas adecuadas; es importante mencionar que predominó el número de trapiches que no cumplieron con ninguno de los seis criterios (39,43 %), mientras que el resto (40,57 %) cumplió con alguno de los criterios establecidos en la metodología.

Por otro lado, se encontró que el área total de la finca panelera con trapiche es de 32 ha en promedio, indistintamente de la categoría y de que se cuente con otros sistemas productivos. En la distribución del tamaño de las fincas paneleras, el 24 % cuenta con más de 40 ha, y tan solo el 17 % cuenta con un área inferior a 10 ha. Además, se podría decir que existe una relación directa entre el tamaño de las fincas y la adecuación de los trapiches, pues se encontró que, a mayor tamaño de la finca, mayor probabilidad de encontrar un trapiche adecuado (figura 17.1).

Por su parte, en cuanto al análisis de la frecuencia de la molienda (figura 17.2), en trapiches adecuados se encuentra que el 50 % opera cada quince días, lo cual se considera como un funcionamiento ideal teniendo en cuenta el sistema de producción predominante en la región: con siembra a chorrillo, corte por parejo, alce y transporte, con apronte de tres a cuatro días. Esta frecuencia de molienda permite notar que posiblemente el tamaño de la finca influye en la realización de adecuaciones en la infraestructura debido a la disponibilidad permanente de cultivos en edad de cosecha para realizar moliendas y obtener acumulación de capital que las financien (De Santis & Barberis, 2013).

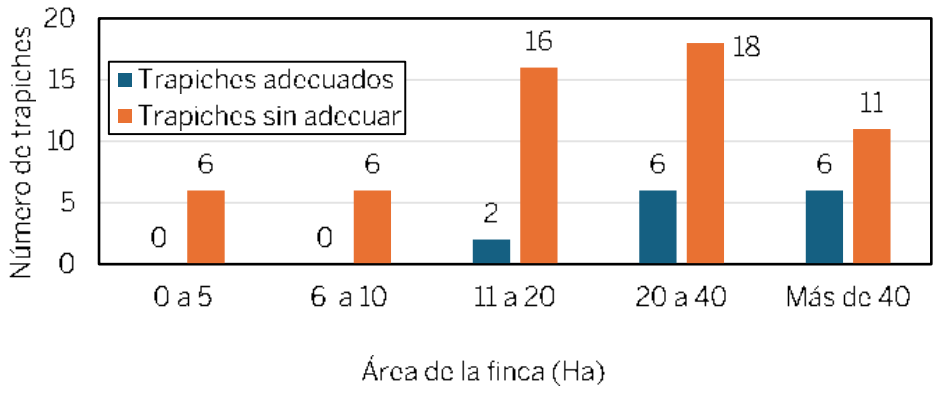


Figura 17.1. Tamaño de las fincas paneleras del municipio de San José de Pare, con trapiches adecuados y sin adecuar.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los trapiches sin adecuar, la frecuencia de molienda menor de doce veces al año (denominada "otra" en la figura 17.2) y la frecuencia mensual presentaron valores del 38,6 % cada una, lo que representa una subutilización de las unidades productivas. Esta característica se evidencia en todas las zonas productoras de panela del territorio nacional, pues se observa que muchos propietarios de pequeñas extensiones de tierra pretenden tener su propia unidad de transformación de caña a panela, pero, debido a la baja frecuencia en las moliendas, se dificulta la inversión en adecuaciones necesarias para cumplir con la reglamentación.

Un aspecto clave para la utilización de las unidades productoras de panela es la distancia entre estas y los cultivos de caña. En el estudio se evidenció que hay trapiches alejados de los cultivos, lo cual hace que el valor del transporte de la materia prima se eleve, y con este los costos de producción, lo que desata la subutilización de algunas unidades y hace inviable la recuperación de la inversión realizada.

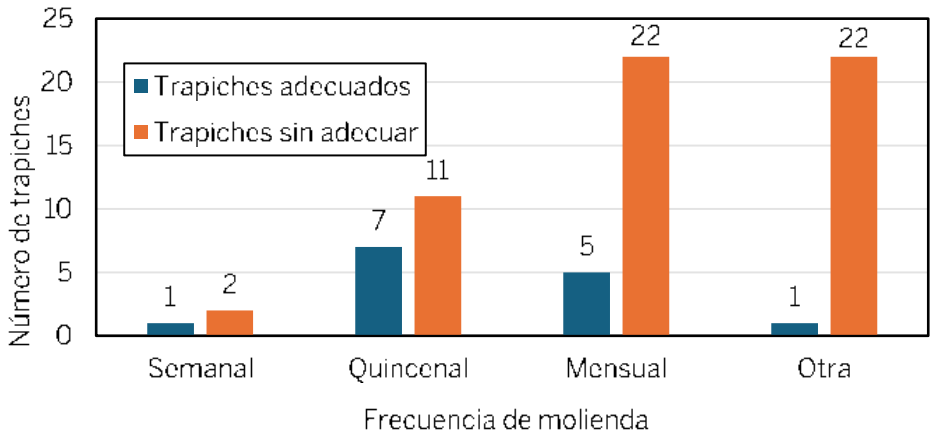


Figura 17.2. Frecuencia de la molienda en los trapiches paneleros del municipio de San José de Pare.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la capacidad de molienda, se identificó que ninguno de los trapiches tiene una capacidad productiva de panela inferior a los 100 kg/h, lo cual diferencia a este municipio de algunas regiones productoras del país donde es posible encontrar producciones de panela de 30 kg/h. Esta capacidad de molienda permite obtener un promedio de entre 14.000 y 16.000 kg de panela en una molienda tradicional, que dura cerca de ocho días, en los que se trabaja las 24 horas.

Variables sociales y culturales en el sistema de producción

Con relación a la experticia y trayectoria en la agroindustria panelera, los propietarios de los trapiches adecuados presentaron un promedio de 25,2 años de experiencia, mientras que los propietarios de los trapiches sin adecuar reportaron un promedio de 38,6 años. Los tiempos relacionados en ambos casos son superiores a la entrada en vigor de la Resolución 779, por lo que se deduce que la trayectoria o los años de permanencia realizando actividades en este subsector no se relacionan con la adecuación de los trapiches.

En relación con la forma de adquisición de la unidad de producción, se encontró, en las adecuadas, que las recibidas como herencia y las compradas o adquiridas representan, cada una, un 40 %, y el 20 % de las unidades restantes fueron construidas por sus actuales propietarios. En los trapiches no adecuados, el 80 % fue comprado y el 20 % construido. Esta situación pone en evidencia una posible relación directa entre la compra de trapiches sin adecuar y la visión económica de generar recursos financieros e invertir poco en adecuación.

Es posible que la errada visión de explotación económica de trapiches sin inversión financiera y la baja tecnificación se incrementen por la resistencia o aversión al cambio y por la incertidumbre del mercado. La primera de ellas es una característica presente en el sector productivo agrícola de Colombia, lo cual limita todo tipo de cambio tecnológico en los procesos productivos, y esto se refleja en los bajos niveles de adopción de tecnología que reportan las diversas instituciones del sector. La segunda característica se relaciona con la alta variación de los precios y, por ende, con la inestabilidad del mercado de la panela. Esta condición se presenta debido a la gran informalidad en que se desarrolla la dinámica comercial de este producto y también a la desinformación sobre las cifras de producción por parte de productores y compradores.

Por su parte, en el análisis realizado sobre el tiempo que llevan los actuales propietarios en sus trapiches, se encontró que, en promedio, los trapiches adecuados fueron adquiridos hace trece años, mientras que los trapiches sin adecuar pertenecen a los actuales dueños desde hace veintitrés años; es decir, a mayor tiempo de tenencia del trapiche, menor es el nivel de adecuación de su infraestructura.

Con los propietarios de trapiches adecuados, se indagó sobre las razones para adecuar sus unidades: el 100 % mencionó que la panela, al ser un alimento, debe producirse en establecimientos adecuados, y que ello les da competitividad; el 60 % dijo que adecuaba sus trapiches por la exigencia del negocio, y el 40 %

aseguró que fue debido a que las ganancias obtenidas han sido suficientes para financiarlo.

En cuanto a las razones por las que consideran que los demás propietarios no han adecuado sus unidades productivas, un 40 % consideró que es debido a falta de ganancias; un 20 % opinó que por falta de ayudas institucionales, y el 40 % restante, por diversas razones, como altos costos en los insumos, falta de comercio para la panela, inestabilidad en los precios y el no considerar al trapiche como una empresa o industria.

A los propietarios de los trapiches sin adecuar se les preguntó sobre lo que necesitaban para adecuar sus unidades productivas: el 100 % respondió que apoyo institucional y estrategias de mercadeo de la panela; un 80 % mencionó la no comprensión del trapiche como empresa, y un 20 % mencionó el apoyo familiar. Es de resaltar que ninguno asoció su respuesta al trámite de créditos financieros, lo cual hace suponer que el tema financiero no ha sido una limitación para realizar las adecuaciones.

Continuando con la exploración de la dinámica social, se les preguntó a los propietarios de los trapiches adecuados y sin adecuar sobre sus lugares de residencia permanente. Con relación al primer grupo, se encontró que el 60 % vive en las fincas donde se encuentran los trapiches, y el 40 % vive en el casco urbano y visita su unidad productiva una vez por semana. El 100 % de los propietarios de los trapiches sin adecuar vive en la misma finca donde se encuentra el trapiche.

Igualmente, se indagó sobre las razones por las que viven en el municipio de San José de Pare, lo cual puso en evidencia razones muy contrastantes entre los dos grupos. El 40 % de los propietarios de los trapiches adecuados respondió que “educar los hijos es más fácil”, y las razones de “negocio”, “porque hay trabajo” y “porque encuentran lo que necesitan” tuvieron un resultado del 20 % cada una. De otro lado, el 60 % de los propietarios de los trapiches sin adecuar señalaron que “encuentran lo que

necesitan", y las razones de "facilidad para educar los hijos" y "la vida es más fácil que en las ciudades" arrojaron resultados del 20 % cada una. Sobre este último grupo, es importante resaltar que ningún propietario mencionó las razones de negocios o de trabajo, lo que permite analizar que, quizás, este grupo no entiende el trapiche como una fábrica o una empresa.

Cuando se les preguntó a los propietarios de los trapiches sobre sus principales grupos de amistades, se encontraron marcadas diferencias. Por un lado, el 80 % de los propietarios de los trapiches sin adecuar tiene su principal grupo de amistad con los vecinos, y solo el 20 % tiene relación con grupos de otros negocios diferentes a los de la panela. En contraste, el 40 % de los propietarios de los trapiches adecuados respondió que su principal grupo de amigos son los vecinos; el 40 % respondió que se relaciona con grupos de otros negocios, y el 20 % restante, con grupos relacionados con negocios de la panela. Esto último podría indicar que este grupo de propietarios, con un mayor relacionamiento en términos de actividades comerciales, tiene una mejor visión comercial, lo que pudo haber influenciado la decisión de adecuar los trapiches para lograr mejores condiciones comerciales para la panela que allí se produce.

Caracterización económica del sistema productivo

A partir del análisis de costos de producción de panela, se determinó que las unidades adecuadas presentaron un valor promedio de COP 1.064/kg, mientras que las unidades sin adecuar presentaron un costo promedio de COP 1.013/kg. Es importante señalar que estos valores contemplan la mano de obra; sin embargo, al ser una actividad informal, no se incluyen los pagos de salud, pensión y parafiscales que se contemplan en los salarios legales en Colombia (tabla 17.1).

Tabla 17.1. Resumen de los costos de producción de los trapiches, por categoría, en COP

Trapiches adecuados						
Concepto	**T01**	**T02**	**T03**	**T04**	**T05**	**Costo promedio (COP/kg de panela)**
Cultivo en plantilla	856	671	543	421	539	606
Procesamiento	372	340	383	491	429	403
Comercialización	25	25	76	72	75	55
Costo de producción de panela empacada (COP/kg)	1.253	1.036	1.002	984	1.043	1.064
Trapiches sin adecuar						
Concepto	**T06**	**T07**	**T08**	**T09**	**T10**	**Costo promedio (COP/kg de panela)**
Cultivo en plantilla	542	610	667	578	743	628
Procesamiento	363	368	397	255	374	351
Comercialización	25	40	40	17	45	33
Costo de producción de panela empacada (COP/kg)	930	1.018	1.104	850	1.162	1.013

Fuente: Elaboración propia

En el componente de comercialización, las unidades adecuadas y sin adecuar presentaron una diferencia de COP 22/kg de panela, debido a factores como la maquinaria de empaque, los materiales de envase y embalaje, y otros gastos ocasionados en la jornada de venta de la panela.

En la dinámica comercial, se encontró una diferencia favorable entre los costos de producción y el precio pagado en el mercado formal; entre 2013 y 2014, el precio reportado de pago a productores fue de COP 1.600/kg de panela, mientras que en 2015 el

precio fue cercano a COP 1.500/kg para panela procedente de trapiches sin adecuar, y de COP 1.600/kg para panela de unidades adecuadas (Fedepanela, s. f.-b). La diferencia entre el costo de producción y el valor pagado por kilogramo de panela en los mercados formales es un valor acumulable en la ganancia de comerciantes e intermediarios por su labor propia de comercialización, situación que ha influenciado el interés de productores propietarios de trapiches por tecnificar su unidad productiva y realizar la comercialización de su producción de manera diferente en estos mercados.

A continuación, se presenta un ejercicio básico de estimación de ganancia y acumulación de capital financiero, en el que se tomaron los valores obtenidos en costos de producción por kilogramo de panela frente a los precios de venta o pagados al productor en el mercado local de Santana (Boyacá), para panela producida tanto en unidades adecuadas como sin adecuar. Además, se tuvieron en cuenta el tamaño de las fincas que se encontraron en la etapa de caracterización y las diferentes frecuencias de molienda, que están influenciadas por el ciclo vegetativo de la variedad RD 75-11 —el material de mayor difusión comercial— en esta región del país, que es de 18 a 20 meses (tabla 17.2).

Tabla 17.2. Cálculo de la ganancia en las unidades productoras de panela según el número de moliendas por año

Concepto	Moliendas al año[a]			
	14	21	28	35
Área del trapiche sembrada en caña (ha)	20	30	40	50
Producción de panela por molienda (kg)[b]	12.000	12.000	12.000	12.000

Continúa

Continuación tabla 16.1

Concepto	Moliendas al año[a]			
	14	21	28	35
Costo de producción (COP/kg de panela)[c]	1.039	1.039	1.039	1.039
Precio de venta (COP/kg de panela)[d]	1.253	1.253	1.253	1.253
Ganancia (COP/kg de panela)[e]	214	214	214	214
Ganancia anual (COP)	35.952.000	53.928.000	71.904.000	89.880.000

[a] Según el ciclo vegetativo de 18 meses de la variedad RD 75-11, la de mayor difusión comercial (Ramírez Durán et al., 2014).

[b] Promedio departamental de producción de panela/ha en 2013.

[c] Costo de producción promedio estimado con la totalidad de las unidades encuestadas.

[d] Precio de venta reportado en el mercado de Santana (Boyacá).

[e] Ganancia estimada promedio con la totalidad de las unidades encuestadas.

Fuente: Elaboración propia

Tomando como referencia el valor promedio indicado por Fedepanela (2009) como inversión requerida en trapiches en proceso de adecuación (COP 35.000.000), es posible calcular que esta inversión se podría recuperar en un periodo de 2-9 años, dependiendo del tamaño de la finca. Para que esto ocurra, se requiere que los productores mantengan una producción estimada de 12.000 kg de panela por molienda, lo cual depende del manejo agronómico que se preste a los cultivos en sus diferentes etapas. También, se debe mantener una estructura de costos de producción que permita una ganancia cercana a los COP 214/kg de panela producida y comercializada, valor que es más fácil de mantener cuando no se depende del mercado local, que presenta semanalmente una alta inestabilidad en los precios. En este análisis económico y de acumulación de capital, es importante resaltar que solo se tuvieron en cuenta el tamaño de la finca, el área sembrada en caña y las moliendas que esta puede generar, dejando como alternativa extra la posibilidad de realizar moliendas a través de maquilas.

Contribución de la modernización de la agroindustria panelera al desarrollo del municipio

Al indagar sobre los principales cambios en el municipio en los últimos treinta años, los propietarios de las unidades adecuadas y sin adecuar coincidieron en mencionar cuatro: una menor tasa de analfabetismo, mejores condiciones de vida rural, un mayor cubrimiento de servicios públicos y una mayor dependencia económica de la agroindustria panelera como principal actividad comercial. Estas cuatro respuestas fueron emitidas por el 100 % de los encuestados. Con frecuencias más bajas, se mencionaron un menor desempleo (el 40 % en trapiches no adecuados y el 20 % en unidades adecuadas), el aumento de escuelas (el 20 % para las dos categorías) y el incremento comercial (el 60 % en trapiches adecuados y el 40 % en unidades no adecuadas). Ningún propietario mencionó como cambio principal un mayor ingreso por la actividad de esta agroindustria.

Al preguntar por las razones de los cambios anteriormente descritos para el municipio de San José de Pare, todos los propietarios de los dos grupos consideraron que por los alcaldes elegidos, el crecimiento del municipio y la llegada de instituciones o empresas. Por su parte, de manera adicional, el 80 % de los propietarios de los trapiches adecuados mencionaron que estos cambios se han dado por la aparición de tecnologías para la agroindustria panelera; el 60 %, por el impulso que representa esta agroindustria, y el 20 %, por la llegada de nuevas personas a la región.

Se indagó también por los beneficios que han recibido como propietarios al trabajar en la agroindustria panelera: todos los propietarios de los dos grupos coincidieron en reconocer la calidad de vida, el aporte al desarrollo del municipio y el poder solventar los gastos familiares. Por su parte, de los propietarios de las unidades adecuadas, el 100 % mencionó el reconocimiento social, frente a un 80 % de los propietarios de las unidades sin adecuar.

Conclusiones

El subsector panelero representa actualmente para San José de Pare (Boyacá) la dinámica social, cultural y económica más importante, por lo que esta cadena es un ejemplo del desarrollo rural con enfoque territorial dinamizado por una agroindustria rural. No obstante, pese a la vocación panelera del municipio de San José de Pare, solo el 20 % de los trapiches pueden ser catalogados como plantas productoras de alimentos adecuadas, teniendo en cuenta el cumplimiento de los parámetros establecidos en la Resolución 779 de 2006 del Ministerio de la Protección Social (2006). Esta situación se puede deber a que los productores con unidades adecuadas y sin adecuar no ven diferencias relativas en el mercado tradicional de panela, por lo que no existe un incentivo adicional, como el económico, para realizar las adecuaciones solicitadas en la resolución y disminuir, así, la aversión al cambio.

El tamaño de la finca panelera y la frecuencia de molienda guardan una relación directa con la posibilidad de realizar las adecuaciones de infraestructura mencionadas en la Resolución 779 de 2006. A mayor tamaño y número de moliendas al año, mayor capacidad para financiar adecuaciones en la infraestructura.

La actividad comercial que representa la agroindustria rural del subsector panelero en el municipio de San José de Pare presenta una dinámica capaz de generar ganancias y acumulación de capital para financiar adecuaciones que permitan el cumplimiento de la Resolución 779 en fincas donde se presenten como mínimo catorce moliendas al año.

Actualmente, el concepto de empresa y agroindustria rural no ha sido incorporado mayoritariamente entre los propietarios de las unidades productoras de panela del municipio de San José de Pare, quienes visualizan su actividad como un proceso poco rentable, incapaz de consolidarse en el tiempo y de alto riesgo para realizar inversiones de capital; por lo tanto, el porcentaje de las plantas no adecuadas según la Resolución 779 de 2006 es del 80 %.

Agradecimientos

Agradecemos a los productores paneleros de San José de Pare por sus aportes en la búsqueda de un mejor país y por permitirnos indagar en sus dinámicas diarias. A AGROSAVIA y Fedepanela por el constante apoyo recibido en la investigación realizada.

Referencias

Alcaldía Municipal San José de Pare Boyacá. (2020, 25 de febrero). *Nuestro municipio*. http://www.sanjosedepare-boyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio

De Santis, G., & Barberis, J. (2013). Análisis en torno al excedente y su acumulación. *Entrelíneas de la Política Económica*, *37*(6), 35-41. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/32460/Documento_completo__.pdf?sequence=1

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2012). *Necesidades Básicas Insatisfechas - NBI, por total, cabecera y resto, según municipio y nacional*.

Fedepanela. (s. f.-a). *Áreas, rendimiento y producción. Proyección para 2020*. http://www.sipa.org.co/wp/wp-content/uploads/CIFRAS_2020_FEDEPANELA.pdf

Fedepanela. (s. f.-b). Plan Estratégico para el Desarrollo del Subsector Panelero 2018-2022. https://fedepanela.org.co/gremio/nuestra-federacion/plan-estrategico

Fedepanela. (2009). *Plan estratégico nacional para el desarrollo del subsector panelero 2009-2016*.

Fedepanela. (2020). *Tendencias de consumo, inteligencia de mercados y retos del sector panelero*. http://www.sipa.org.co/wp/wp-content/uploads/Tema4_Ciclo_conferencias.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2018). *Cadena agroindustrial de la panela*. https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/2018-12-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Ministerio de la Protección Social. (2006, 17 de marzo). Resolución 000779. Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización

de la panela para consumo humano y se dictan otras disposiciones. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolucion-779-de-2006.pdf

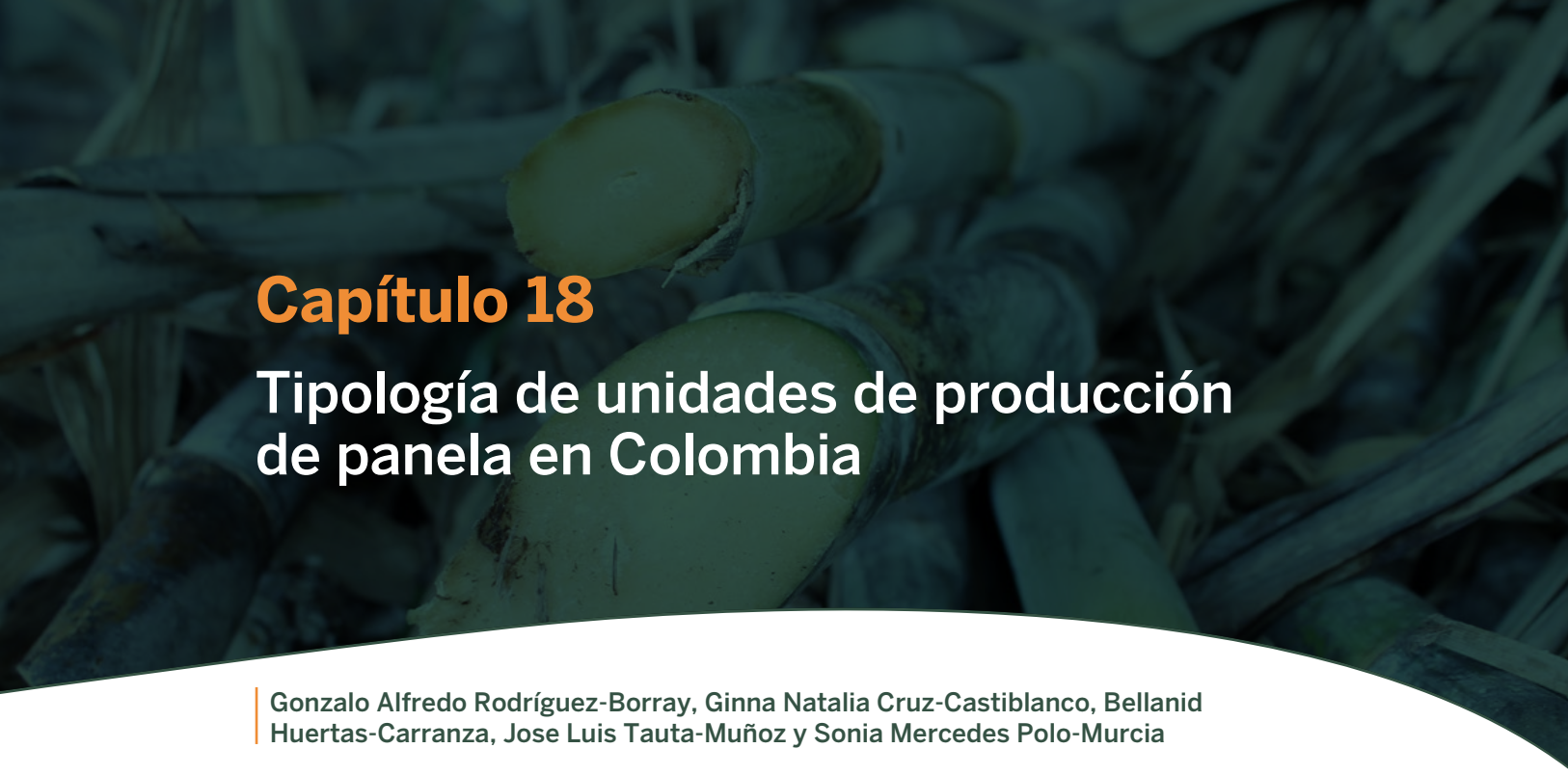
Ovalle Muñoz, Y. L. (2014). *Cadena agroindustrial de la panela*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/2014-07-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *15*(2), 183-195. http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/358/348

Rodriguez, G., Garcia, H., Roa Diaz, Z., & Santacoloma, P. (2004). *Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina* [AGSF: documento de trabajo 6]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf

Rodríguez Borray, G. (2005). La agroindustria rural de la panela en Colombia: roles, problemática y nuevos retos. *Revista Innovación y Cambio Tecnológico*, *40*(1), 5-11. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/15213/42693_46790.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vásquez Chaves, H. (2019). Aproximación a la problemática de la producción de panela en el municipio de Topaipí - Cundinamarca. *Opinión Pública*, (11), 67-79. https://revistas.cun.edu.co/index.php/opinionpublica/article/view/554



Capítulo 18

Tipología de unidades de producción de panela en Colombia

Gonzalo Alfredo Rodríguez-Borray, Ginna Natalia Cruz-Castiblanco, Bellanid Huertas-Carranza, Jose Luis Tauta-Muñoz y Sonia Mercedes Polo-Murcia

Resumen

La producción de panela en Colombia se desarrolla en entornos agroecológicos, económicos y culturales diversos, lo cual provoca que las tecnologías de cultivo y procesamiento de caña de azúcar para panela en las unidades de producción (UP) varíen dentro y entre regiones. El objetivo de este estudio fue analizar sistemáticamente las diferencias en las características socioeconómicas y técnicas de las UP de panela en Colombia y sus implicaciones para la orientación de las políticas de ciencia y tecnología para el subsector panelero. Con este propósito, se aplicaron 759 encuestas representativas a nivel nacional, distribuidas en doce departamentos. Se clasificó la diversidad de UP mediante un análisis multifactorial de datos mixtos y con la construcción de un clúster jerárquico. Se identificaron tres tipos diferenciados de UP: tipo I (396 UP; el 52,17 %): UP de pequeña escala y menor tecnificación; tipo II (201 UP; el 26,49 %): UP de escala media, niveles intermedios de tecnificación y con diversificación productiva; tipo III (162 UP; el 21,34 %): UP empresariales con adopción de tecnologías y especialización en la producción de panela. Así pues, cualquier intervención dirigida a realizar innovaciones tecnológicas debe tomar en cuenta el contexto medioambiental y la heterogeneidad de las UP en cuanto a sus características socioeconómicas y productivas.

Palabras clave: tipificación, unidades de producción, análisis multifactorial de datos mixtos, clúster jerárquico, niveles de tecnificación, adopción de tecnologías

Introducción

La producción de panela en Colombia tiene un carácter dual, pues involucra dos tipos de emprendimientos: productores de agricultura familiar, de pequeña escala y de carácter informal, y productores de carácter empresarial, de mediana a gran escala productiva (Rodriguez et al., 2007). Los agricultores familiares dependen principalmente de su propio trabajo familiar para producir alimentos para su subsistencia y el mercado (Saridakis et al., 2021), tienen un fuerte arraigo cultural y se basan en la experiencia y la tradición en el sistema de producción (Hamelin et al., 2021). Entre tanto, los empresarios se insertan en la agroindustria panelera con una mayor dotación de capital, lo que les permite adoptar más fácilmente nuevas tecnologías e incrementar la producción y la eficiencia de los procesos.

Además de los problemas socioeconómicos generados por su dualidad productiva, la agroindustria panelera enfrenta fuertes amenazas, como la disminución progresiva de la demanda de panela en los hogares, la competencia con otros edulcorantes, la escasez de mano de obra, la variabilidad climática, la erosión y pérdida de fertilidad del suelo, el alto consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero. Estas dinámicas complejas limitan la adopción de tecnologías "duras", como nuevas variedades de caña de azúcar, bioproductos para el manejo del cultivo o equipos para el procesamiento, así como la posibilidad de aprovechar tecnologías "blandas", como las tecnologías de la información (TIC), para brindar capacitaciones a los productores o para aumentar las ventas mediante el *marketing* digital o una comunicación más eficiente con los administradores de otros mercados a nivel regional, nacional o internacional.

En este estudio se analizaron las variaciones y brechas en los niveles de tecnología empleados en la agroindustria rural de producción de panela en Colombia. Con este propósito, se realizó una caracterización de la diversidad de unidades de producción (UP), basada en un análisis multifactorial de datos mixtos. Los objetivos de este estudio fueron 1) identificar tipologías de UP de panela en Colombia que sean representativas de la heterogeneidad de varias estructuras productivas, y 2) desarrollar un dominio de recomendación específico para cada tipología de UP. Las variables involucradas en la construcción de las tipologías fueron elegidas en función del objetivo de la investigación. Por lo tanto, este estudio se suma a la literatura sobre la identificación de tipologías de sistemas agrícolas y agroindustriales, lo que permite reflexionar sobre cómo estas tipologías y su heterogeneidad pueden usarse de manera efectiva en el diseño de un marco de políticas adecuado que apoye los sistemas de innovación.

Metodología

Área de estudio

El estudio se realizó en 85 municipios paneleros de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cesar, Cundinamarca, Huila, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Santander y Tolima, priorizando pequeñas y medianas producciones (figura 18.1). En estos departamentos se concentra el 91,7 % de la producción de panela del país, con un total de 1.075.350 toneladas de producción total (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2019), y sus esquemas de producción son socialmente diferentes y espacialmente heterogéneos, razón por la cual fueron seleccionados para el análisis.



Figura 18.1. Departamentos de Colombia seleccionados para la clasificación de las UP de panela.

Fuente: Elaboración propia

Datos y muestreo

El análisis se basó en datos recopilados mediante una encuesta representativa a nivel nacional, aplicada a 759 UP de panela (figura 18.2). El tamaño total de la muestra se asignó, en primer lugar, a doce de los departamentos productores de panela y, proporcionalmente, al número de UP de cada departamento. El número entre paréntesis indica la cantidad de encuestas realizadas por municipio y por departamento.

Cesar (11)
Municipios: González (4), Pueblo Bello (2) y Valledupar (5)

Norte de Santander (43)
Municipios: Arboledas (6), Chinácota (2), Convención (5), Cucutilla (4), Gramalote (2), Labateca (5), Lourdes (3), Ragonvalia (1), Salazar (1), Santiago (3), Sardinata (1) y Toledo (10)

Antioquia (78)
Municipios: Angostura (15), Campamento (10), Frontino (9), Nariño (11), San Roque (11), Santo Domingo (6) y Yolombó (16)

Caldas (57)
Municipios: Filadelfia (8), Riosucio (16), Samaná (8) y Supía (25)

Risaralda (26)
Municipios: Belén de Umbría (3), Pueblo Rico (6) y Quinchía (17)

Santander (19)
Municipios: Barbosa (1), Chipatá (1), Güepsa (4), La Paz (1), San Benito (4), Suaita (5) y Vélez (3)

Boyacá (26)
Municipios: Chitaraque (4), Moniquirá (5), San José de Pare (4), Santana (7) y Togüí (6)

Cundinamarca (159)
Municipios: Caparrapí (36), El Peñón (10), La Peña (29), Nimaima (8), Nocaima (20), Quebradanegra (12), Quipile (8), Útica (10) y Villeta (26)

Tolima (78)
Municipios: Alvarado (8), Anzoátegui (3), Casabianca (2), Falan (9), Fresno (10), Ibagué (9), Planadas (3), Mariquita (22), Ortega (4), Rioblanco (4) y Palocabildo (4)

Huila (94)
Municipios: Acevedo (2), Algeciras (5), Gigante (2), Isnos (43), La Argentina (4), La Plata (4), Neiva (4), Pitalito (3) y San Agustín (27)

Caquetá (20)
Municipios: Albania (2), Belén de los Andaquíes (2), El Doncello (2), Florencia (6), Morelia (1), Puerto Rico (2), San José del Fragua (3) y San Vicente del Caguán (2)

Nariño (148)
Municipios: Ancuya (28), Consacá (19), El Tambo (13), Linares (13), Ricaurte (39), Samaniego (11) y Sandoná (25)

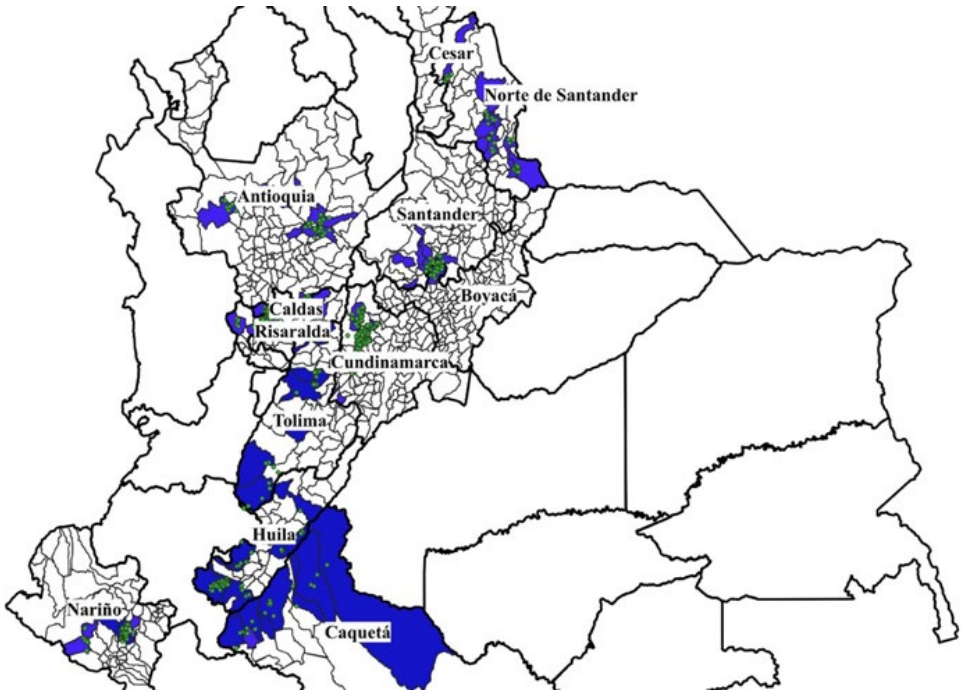


Figura 18.2. Distribución de las encuestas.

Fuente: Elaboración propia

El método de muestreo utilizado para esta encuesta fue el muestreo estratificado en varias etapas (Parsons, 2017). Para realizar la encuesta, se entrevistó al jefe de hogar o a un adulto con conocimiento del proceso de producción de panela y de las actividades económicas de la UP. La recolección de los datos fue realizada durante el periodo 2016-2020 por cuatro equipos de campo, cada uno compuesto por dos encuestadores y un supervisor. Cada encuestador recopiló los datos en papel, y posteriormente fueron digitalizados en una base de datos. Para garantizar la validez de los datos de la encuesta, un grupo de investigadores de AGROSAVIA experto en la agroindustria panelera realizó un control de calidad independiente para supervisar la recopilación de los datos.

La encuesta se dividió en seis secciones: 1) identificación de la UP, 2) actividades productivas de la UP, 3) aspectos técnicos del cultivo, 4) descripción de la planta de proceso, 5) aspectos sociales y 6) manejo de subproductos y residuos. De esta manera, se completó una base de datos con 72 variables cualitativas y 6 cuantitativas. Para reducir las variables de análisis, se eliminaron aquellas con información redundante, es decir, las que presentaban una distribución mayor al 95 % en una sola de sus respuestas. Posteriormente, bajo criterio del equipo de investigación, se descartaron las variables que no contribuían al análisis para diferenciar los niveles tecnológicos de las UP. El análisis de la información se realizó mediante el programa estadístico R, versión 3.6.3, en el sistema operativo de Windows 7.

Análisis de datos e identificación de tipologías

A partir de las variables seleccionadas, se realizó un análisis multifactorial de datos mixtos (AFDM) (Kostov et al., 2015; Shukla et al., 2019) para resumir las variables en dimensiones (algunas de ellas afines) y poder entender la relación entre estas. Para ello, se indicaron la cantidad de dimensiones óptimas; el aporte por variable-categoría mediante el Cos2, que indica la importancia de cada variable en la dimensión (valores más altos), y el porcentaje de varianza explicado con base en los valores propios (mayores a uno), los cuales representan la proporción de información que recoge cada dimensión (Osorio Cardona et al., 2020).

Con los resultados del AFDM, se procedió a realizar agrupaciones mediante análisis de clúster usando la distancia euclidiana y el método de Ward (Blazy et al., 2009), con el fin de describir los aspectos relevantes de cada uno de los grupos; además, se elaboraron tablas de contingencia para las variables cualitativas y se realizaron pruebas de chicuadrado y pruebas z para comparar las proporciones asociadas a cada variable. A las variables cuantitativas se les realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($p < 0{,}05$) para determinar las diferencias estadísticas entre grupos.

Las variables cuantitativas incluidas en el análisis fueron las siguientes: área total de la finca (ha), área total sembrada en caña (ha), participación de la caña en el área total de la finca (%), capacidad de producción de panela (kg/h), producción anual de panela (t) y edad del jefe del hogar (años). Las variables cualitativas se presentan en la tabla 18.1, y las distintas categorías que toman estas variables se presentan en el desarrollo de este capítulo, a excepción de aquellas con signo de interrogación, que se respondían con "sí" o "no".

Tabla 18.1. Variables cualitativas incluidas en la caracterización y determinación de las tipologías de UP de panela

Variable	Código
Tipo de topografía predominante en la finca	Topo
Tipo de variedad presente en la finca	Var_Caña
Método de cosecha o sistema de corte	Sis_Corte
Tipo de fertilización	T_Fert
Método de control de malezas	C_Arv
Método de control de plagas y enfermedades	C_Fito
Combustible del motor del molino	Mot_Comb
Tipo de hornilla	Horn
Método de transporte de caña	Trans_Caña
Forma de los evaporadores	F_Casc
¿Está aislada el área de la bagacera?	Ais_Bag
¿Está aislada el área de batido, moldeo y empaque?	As_Bat_Mol_Emp
¿Tiene prelimpiador?	Prelimp
Material de la cachacera	M_Cach
Material de la melotera	M_Melotera
¿Tiene picadora de caña?	Picadora_C
¿Compra clarificante (aglutinante)?	Comp_Clari
Tipo de presentación de la panela	T_Panela
Usos de la palma o cogollo	U_Palm_cog
¿Prepara compostaje?	Est_Compost
Usos dados al bagacillo	U_Bagacillo

Continúa

Continuación tabla 18.1

Variable	Código
Usos dados a la cachaza	U_Cachaza
Usos dados a la ceniza	U_Ceniza
Género del jefe del hogar	J_Hogar
¿Trabaja el jefe del hogar en la finca?	Trab_Finca
¿Pertenecen a alguna asociación agropecuaria?	Asociación
¿Trabaja el núcleo familiar en la finca?	Trab_NFam
¿Contratan mano de obra externa?	Trab_Contrato

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Exploración inicial de las características técnicas y sociales de las UP

Los cultivos de caña de azúcar para producción de panela en Colombia están establecidos en terrenos ondulados (48,5 %), en pendiente (43,9 %) y en áreas planas (7,6 %). Se evidencia una baja adopción de nuevas variedades de caña de azúcar, pues el 79 % de las unidades encuestadas siembra variedades tradicionales (Canal Point 57603, Palmireña, POJ, Rusia, ZC, etc.), y solo el 21 % cuenta con variedades introducidas (Cenicaña y RD).

En cuanto a cosecha, predominan los tipos de corte por entresaque, en el que se realiza la cosecha de los tallos maduros, dejando en pie aquellos tallos considerados inmaduros (61,4 %), y el corte por parejo, en el que se hace la cosecha total de los tallos (33,2 %); además, en algunas UP (3,4 %) se encontró un sistema especial de corte, en el cual se realiza corte por parejo, pero no se hace renovación de cepa, por lo que se identifica como corte por parejo sin renovación, y el resto de las unidades (2 %) maneja ambos tipos de corte.

Respecto a la fertilización del cultivo, el 36,9 % de las UP realiza fertilización química; el 12 %, fertilización orgánica; el 8,8 %, fertilización tanto química como orgánica, y el 42,3 % no realiza

fertilización. El control fitosanitario solo es realizado por el 33,1 % de las UP, y se combinan prácticas de control biológico, químico y cultural. Finalmente, el manejo de arvenses se realiza principalmente de forma manual (54,5 %), una proporción menor realiza aplicaciones de herbicidas (42,3 %), mientras que una minoría (3,2 %) no reportó ningún tipo de manejo de arvenses.

En la planta de procesamiento o trapiche, el 64,7 % de las UP dispone de un tanque prelimpiador para eliminar algunas impurezas presentes en el jugo de la caña luego de su extracción en el molino; de estos, el 57 % es construido en acero inoxidable, y el 43 % en otros materiales como cemento, baldosas o ladrillo. Cabe resaltar que el 35,3 % de las UP no cuenta con prelimpiador en el proceso de producción de panela.

Durante la operación de limpieza de jugos en las etapas de evaporación y concentración, se genera un sobrenadante de naturaleza coloidal de color marrón llamado "cachaza", el cual se usa como fuente de alimento animal y como fertilizante orgánico o enmienda para el suelo; este es recolectado en recipientes denominados "cachaceras". Al respecto de las cachaceras, en el 65,5 % de las UP, este recipiente es de material tradicional (plástico, hierro colado o aluminio); en el 20,3 % es de acero inoxidable, y el 14,2 % de las UP encuestadas no registró información respecto a este utensilio.

Por su parte, el 65,7 % de las UP no dispone de paila melotera en la hornilla para la cocción de la cachaza; el 31,2 % de las UP cuenta con melotera de hierro fundido, y el 3,1 % cuenta con melotera de acero inoxidable.

El procesamiento de la caña de azúcar para panela se realiza mediante la evaporación abierta de los jugos. Al respecto, el 78,7 % de las UP encuestadas que procesan directamente la caña de azúcar tienen cámara de combustión plana tradicional, mientras que apenas el 20,5 % posee construcciones de cámara plana mejorada, o Ward, la cual ofrece una mayor flexibilidad al productor para realizar las moliendas, pues permite utilizar

bagazo con humedades del 45 %. Según la configuración de los evaporadores, en el 52 % de las UP encuestadas el flujo de los jugos de caña a través de la hornilla se realiza en paralelo al flujo de los gases de combustión, es decir, los gases circulan en la misma dirección que los jugos, mientras que en el 48 % de los casos el movimiento de los jugos entre evaporadores es en contraflujo (los jugos y los gases circulan en dirección opuesta) o de forma mixta.

En el 94 % de las UP encuestadas, el área de evaporación (pailas) utiliza evaporadores semiesféricos tradicionales, y apenas el 6 % utiliza evaporadores con diseño geométrico pirotubular o aleteado, tecnologías que permiten aprovechar la energía suministrada por la cámara de combustión (hornilla) de forma más eficiente (Rodríguez et al., 2018). Las áreas de proceso no presentan divisiones físicas en la mayoría de las zonas encuestadas (78 %); esta condición de infraestructura deficitaria puede suponer un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores y a su vez exponer a las UP a pérdidas o daños materiales de maquinaria y equipos, así como a la obtención de productos con baja calidad e inocuidad. En este sentido, el área de almacenamiento del bagazo, que se utiliza como material combustible, se encuentra, en el 72 % de los casos, bajo la misma cubierta que el resto de la planta de procesamiento, y solo el 28 % de las UP encuestadas tienen un área aislada para tal fin.

La zona en la que se reciben las mieles terminadas para permitir su solidificación hasta alcanzar la forma definitiva de la panela se denomina "área de elaboración" o "cuarto de batido y moldeo" (García et al., 2007). Al respecto, el 68 % de las UP encuestadas no cuentan con este espacio, por lo que este proceso se realiza en las mismas instalaciones donde se lleva a cabo el proceso de evaporación y concentración de los jugos de caña; el 32 % restante cuenta con un área separada para estos propósitos, lo cual evita que el producto terminado se contamine y permite mejorar la calidad de la panela que se vende en mercados nacionales e internacionales.

En lo que concierne a la elaboración de la panela, se observa que el 90,3 % de las UP la produce únicamente en bloque; el 4 % produce panela corriente y panela granulada, y el 5,7 % produce panela en bloque y panelas especiales en pastillas.

Con relación al uso de subproductos y residuos, se observa que gran parte de los productores aprovecha de forma directa en el cultivo algunos residuos del procesamiento: el 59,7 % usa la ceniza; el 18,3 % usa el bagacillo, y el 5,1 % usa la cachaza. En cuanto a la elaboración de compostaje, el 14,2 % usa como fuente el bagacillo, y el 3,5 % la ceniza. Igualmente, el 74 % de las UP usa como fuente de alimentación animal la cachaza (70,2 %) y el bagacillo (3,8 %) (figura 18.3).

En relación con los aspectos sociales, se observa que la edad promedio de los jefes de hogar es de 56,7 años; el 88 % corresponde al género masculino, y tan solo el 12 % al femenino, lo que concuerda con lo reportado por Ramírez Gil (2017), quien describe que la fuerza de trabajo asociada al sistema de producción panelera está conformada en un 80 % por el sexo masculino y en un 20 % por el femenino. Por otro lado, el 84,1 % de los jefes de hogar trabaja dentro de su propia UP, y solo el 19,6 % realiza contratación de mano de obra externa a la UP. El nivel educativo más frecuente del jefe de hogar es de básica primaria, y tan solo el 0,49 % tiene nivel profesional.

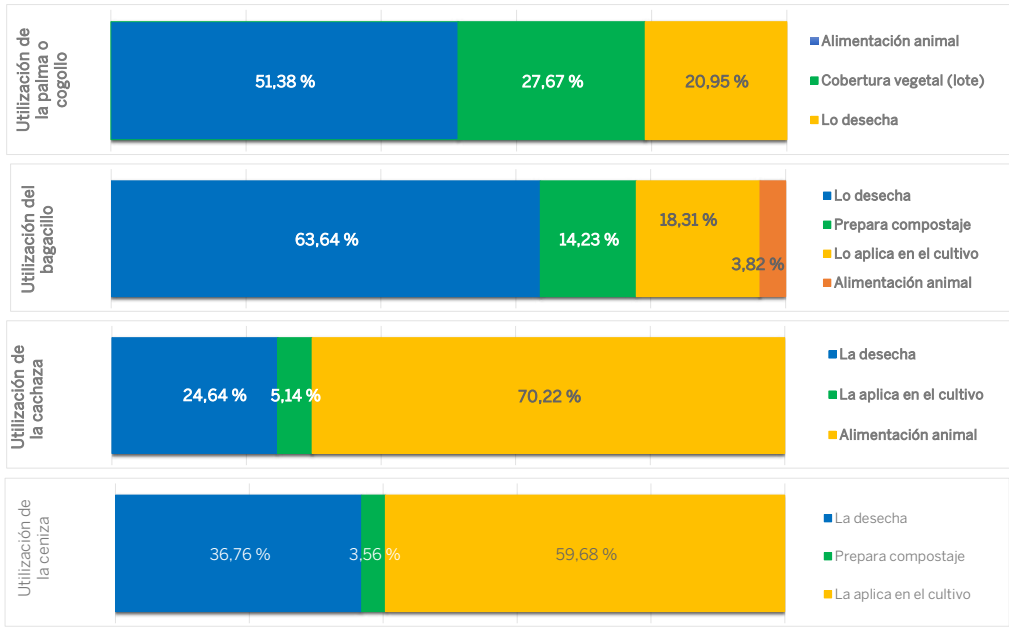


Figura 18.3. Uso de subproductos y residuos en el sistema productivo de caña de azúcar para producción de panela.

Fuente: Elaboración propia

Tipos de UP de panela en Colombia

El AFDM mostró como óptimas quince dimensiones que representan un conjunto de variables, las cuales reúnen el 63,5 % de la variabilidad acumulada, lo que permite explicar la relación e importancia de las variables dentro de cada componente (anexo 18.1). En la figura 18.4 se presentan las variables que tienen mayor importancia dentro de las tres primeras dimensiones, destacándose las variables asociadas a fertilización, sistema de corte, uso de ceniza, uso de cachaza, uso de bagacillo, materiales de las cachaceras y prelimpiadores.

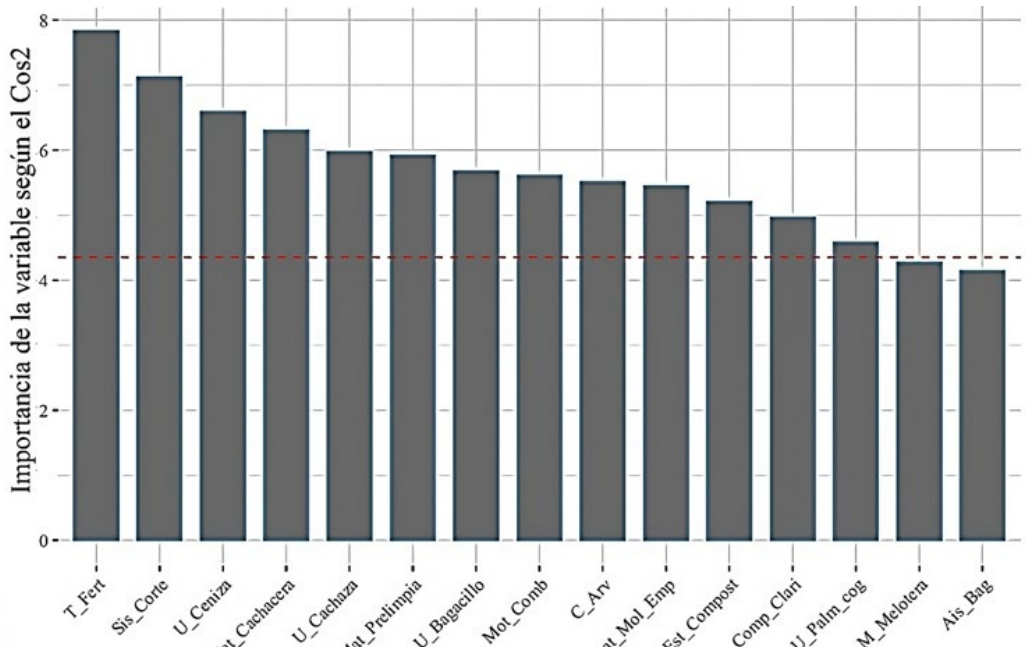


Figura 18.4. Importancia de las variables en las dimensiones 1, 2 y 3 del AFDM, de acuerdo con el coeficiente Cos2.

Nota: El valor del coseno cuadrado Cos2 indica la calidad de la variable representada en el mapa de factores.
Fuente: Elaboración propia

El agrupamiento de las UP representado en el análisis de clúster sobre el mapa de factores producto del AFDM se presenta en la figura 18.5; este permitió identificar tres tipos de UP: el primero representa el 52,1 % de las UP; el segundo, el 26,5 %, y el tercero, el 21,3 %. Los individuos presentes en la intercepción de los conjuntos posiblemente tienen información común con más de un grupo; sin embargo, tienden a pertenecer a una tipología, posiblemente porque se encuentran en una transición tecnológica.

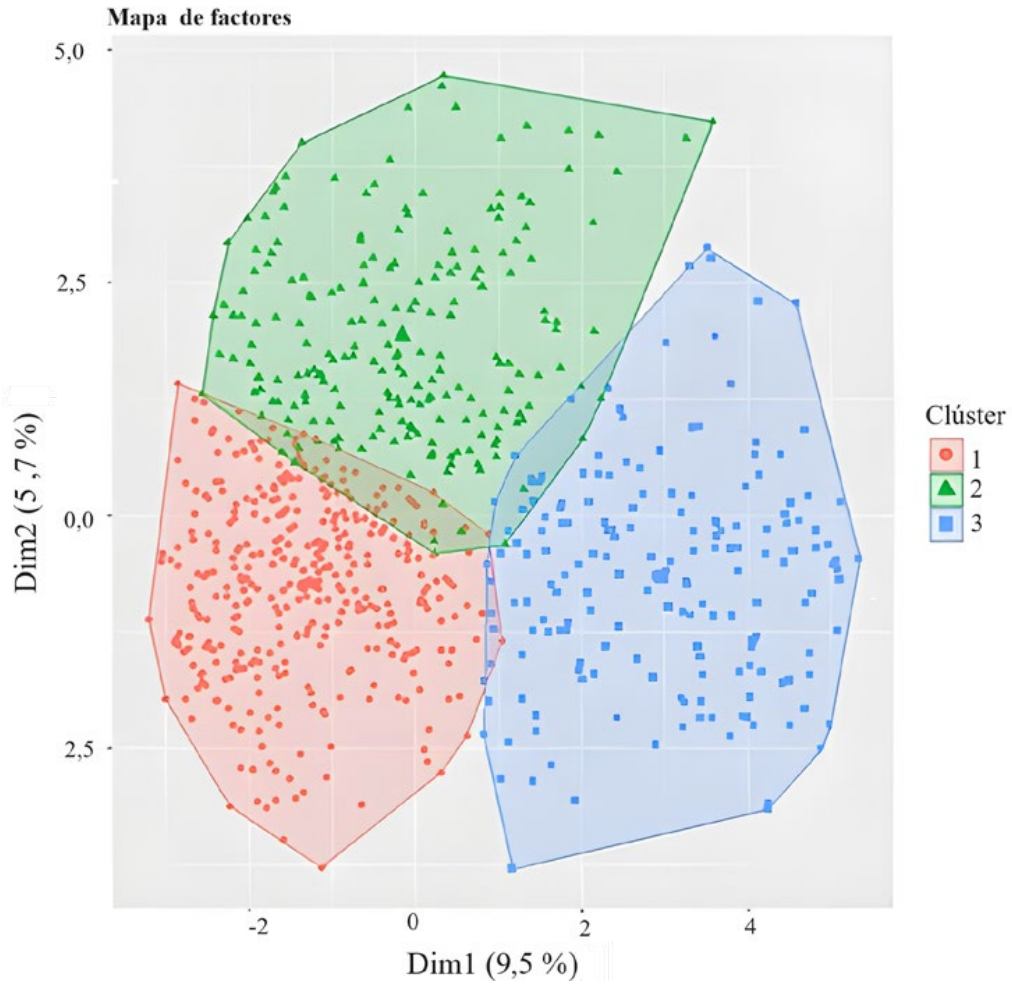


Figura 18.5. Agrupamiento de los productores de caña panelera de acuerdo con características similares, usando el análisis de conglomerados.

Nota: Los ejes Dim1 y Dim2 representan las dimensiones 1 y 2, generadas a partir del AFDM, las cuales se usaron para realizar los clústeres.
Fuente: Elaboración propia

Tipo I (*n* = 396): representa las UP de pequeña escala y menor tecnificación: corresponde al 52,1 % de las UP, localizadas principalmente en Cundinamarca, Caldas, Nariño, Tolima y Huila; poseen un área promedio de caña de azúcar de 4,5 ha, con capacidad de producción de 70,7 kg de panela/h y un volumen de producción

anual de 37,8 toneladas de panela. Según datos de Fedepanela, en Colombia, "el 88,2 % de los productores de caña tienen en sus unidades productivas menos de 4,9 ha en caña"; esto indica que la producción panelera en Colombia se hace "en pequeños y medianos establecimientos con capacidades inferiores a los 200 kg de panela/h" (Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA], 2014). En cuanto a sus características socioeconómicas, el tipo I presenta una mayor participación de mujeres como jefes de hogar (16 %); la menor edad promedio de los jefes de hogar, con 53 años, y los menores niveles de contratación de trabajadores y de asociatividad; respecto a esto, Ramírez Gil (2017) indica que el sistema productivo de caña tiene grandes problemas asociados a bajos niveles tecnológicos, deficiente infraestructura para el procesamiento agroindustrial y bajos niveles de asociatividad y comercialización. Desde el punto de vista de la tecnología de cultivo, el tipo I se caracteriza porque la mayor parte de las UP utiliza variedades de caña tradicionales (89,6 %), no fertiliza los cultivos (59,6 %), hace control manual de arvenses (67 %), no realiza control fitosanitario (77 %) y corta la caña por entresaque (74,2 %). En cuanto a la tecnología de proceso, la mayoría de las UP utiliza motores diésel para accionar los molinos (84,5 %), hornillas tradicionales con cámaras de combustión planas (80,1 %) e intercambiadores de calor semiesféricos (97,9 %); además, los trapiches generalmente no tienen aisladas las áreas de bagacera y de batido, moldeo y empaque de la panela (87,8 %). Desde el punto de vista de los subproductos, es el tipo de UP que menor uso hace de la palma, el bagacillo y la cachaza (anexo 18.2).

Tipo II (*n*=201): representa las UP de escala mediana, con niveles intermedios de tecnificación y diversificación productiva: corresponde al 26,5 % de las UP encuestadas, localizadas en su mayoría en los departamentos de Antioquia, Norte de Santander y Cundinamarca; poseen áreas en caña de 10,3 ha en promedio, con capacidad de producción de 75,7 kg de panela/h, una producción anual de 53,1 toneladas de panela, un índice de especialización en caña para panela del 45 % del área de las fincas y producción de formas diversificadas de panela pulverizada en un

6 % de los casos. Castellanos Domínguez et al. (2010) describen que el sistema de producción de caña panelera está conformado por pequeñas y medianas parcelas que han pasado por procesos de transformación artesanal, ubicadas en zonas de alta montaña, con límites naturales de fertilidad del suelo, baja mecanización, mano de obra de base familiar y bajos niveles de tecnología o capital de inversión. Desde el punto de vista socioeconómico, estas UP se caracterizan por la baja participación de las mujeres como jefes de hogar (9 %); por una edad promedio de 55 años en los jefes de hogar, que además tienen los mayores niveles de analfabetismo (17 %), y por tener los mayores niveles de contratación de trabajadores y de asociatividad. Respecto a la asociatividad, en un estudio realizado por León Sánchez y Useche Cárdenas (2018) en caña de azúcar y panela, el 100 % de las familias afirmaron que el haberse agremiado como asociación les permitió mejorar los procesos de comercialización y adquisición de maquinaria bajo la figura de donación, así como acceder más fácilmente a estrategias de transformación e innovación de la panela.

En cuanto al manejo de los cultivos, cerca de una cuarta parte de las UP ha introducido nuevas variedades de caña (25,4 %); una tercera parte usa fertilizantes orgánicos (32,3 %), controla problemas fitosanitarios (32,3 %) y utiliza químicos para el control de arvenses (34,8 %), y la mayoría realiza el corte por entresaque (77,1 %). En cuanto al procesamiento de la caña, en este tipo predomina la utilización de motores diésel (60,2 %) y eléctricos (34,3 %), con mayores niveles de adopción de hornillas mejoradas (21,8 %) y de pailas meloteras (69,1 %).

Respecto al uso de subproductos, se observa que el tipo II es el que mayor utilización hace de la palma de la caña, el bagacillo recuperado en los prelimpiadores y la ceniza generada por los combustibles quemados en las hornillas; en general, estos elementos son aprovechados para alimentación de animales de la finca y como abono orgánico de caña y otros cultivos. Asimismo, la utilización y aprovechamiento de estos subproductos ha contribuido a ampliar las posibilidades de diversificación de las actividades de la UP, así

como a integrar a la mujer campesina en labores diferentes a las de su rol tradicional, como el manejo y administración de actividades de producción animal (Rodriguez et al., 2007) (anexo 18.2).

Tipo III (*n*=162): representa las UP empresariales, con mayor adopción de tecnologías y especialización en la producción panelera: corresponde al 21,3 % de las UP, ubicadas principalmente en los departamentos de Santander, Boyacá y Nariño. El área en caña es de 10,6 ha en promedio, con una producción promedio de panela de 127,5 kg/h, una producción anual de 106,6 toneladas y un índice de especialización en caña panelera del 59 %; según datos de la FAO en Colombia, el área de la finca ocupada por el cultivo de caña es cercana al 68 %. Desde el punto de vista socioeconómico, estas UP tienen la menor participación de las mujeres como jefes de hogar (6 %), una edad promedio de 56 años de los jefes de hogar y los menores niveles de analfabetismo (6 %).

En el tipo III, el manejo del cultivo se caracteriza por tener los mayores niveles de introducción de nuevas variedades de caña (40,7 %), aunque predominan las variedades tradicionales. La mayor parte de los productores realiza fertilización química (79 %), control de arvenses con herbicidas (55,6 %), manejo de problemas fitosanitarios con productos biológicos (37,04 %) y corte de la caña por parejo (88,8 %). Respecto al manejo del procesamiento, predominan los motores eléctricos (82,7 %), el uso de prelimpiadores, el aislamiento de las áreas de bagacera de las áreas de batido, moldeo y empaque de la panela (74,6 %), así como intercambiadores de calor (y sus falcas) en acero inoxidable.

En cuanto al uso de los subproductos, el tipo III es el que mayor utilización hace de la cachaza y presenta niveles intermedios de uso de palma y bagacillo (anexo 18.2). De acuerdo con lo anterior, este tipo de UP tecnificadas de caña implica el corte por parejo y obliga el uso de agroquímicos, una alta densidad de siembra y la obtención de altos rendimientos, "con rangos entre 80 y 170 t de caña por hectárea" (León Sánchez & Useche Cárdenas, 2018).

Dominios de recomendación por tipología de UP

El tipo I tiene la mayor representatividad en la muestra; está compuesto por UP con un alto arraigo social a los sistemas agrícolas tradicionales y una menor dotación de tierra y capital, condiciones que generan una menor adopción de nuevas tecnologías que impliquen una inversión significativa de recursos monetarios para los productores. En esta situación, se debe apuntar a desarrollar y validar tecnologías apropiadas para cultivos manejados por entresaque; a mejorar la eficiencia energética de los trapiches, mediante la reforma de hornillas individuales; a construir nuevas hornillas, de mayor capacidad productiva, que asocien a productores de pequeña escala, y a diseñar programas de capacitación tecnológica dirigidos principalmente a mujeres y jóvenes rurales.

En el tipo II se debe fomentar la agricultura diversificada, lo que disminuirá la vulnerabilidad de los productores a la inestabilidad cíclica de los precios de la panela. La implementación de sistemas de producción animal en las fincas paneleras favorecerá la generación de nuevos ingresos agrícolas y la seguridad alimentaria tanto en el hogar como en las regiones paneleras, muchas de las cuales actualmente tienen que adquirir bienes alimentarios, principalmente proteína animal, de otras regiones del país y del exterior. Además, se deben fortalecer las alianzas entre las asociaciones, con el fin de generar capacitaciones relacionadas con la implementación, uso y manejo de nuevas tecnologías y variedades, para así aumentar su adopción dentro de los sistemas productivos.

En contraste, el tipo III exhibe un comportamiento empresarial, lo cual indica que la generación de ingresos va más allá de satisfacer únicamente las necesidades de subsistencia, pues también permite invertir excedentes en la generación y transferencia de prácticas de cultivo más sostenibles y en el mejoramiento de las instalaciones y operaciones de procesamiento, dirigidas a aumentar la productividad agrícola e industrial, disminuir los costos de producción y mejorar la calidad y la presentación de la panela, en búsqueda de

nuevos segmentos de mercado, de mayor capacidad adquisitiva a nivel nacional y de mercados de exportación.

Conclusiones

En este estudio se utilizaron datos de una encuesta de corte transversal, representativa a nivel nacional, realizada en doce departamentos productores, lo que permite describir de forma más general los resultados de la producción de caña para panela en el país. Lo anterior permitió identificar distintos grupos o tipos heterogéneos de UP agroindustriales de panela. Los resultados indican que, a la hora de diseñar innovaciones tecnológicas para la agroindustria panelera, no solo es importante considerar la dotación de recursos, sino también las características socioculturales de los productores. En este sentido, las políticas de ciencia y tecnología agropecuaria para el subsector panelero deben focalizarse en la investigación y el desarrollo de tecnologías apropiadas a cada tipología de productores, así como en el diseño y ejecución de programas de transferencia adaptados a las características socioculturales de cada tipo de UP, como los aquí identificados.

Agradecimientos

En primer término, agradecemos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por el financiamiento del proyecto "Indicadores de competitividad y sostenibilidad de modelos productivos regionales de la agroindustria panelera colombiana", y al Sistema General de Regalías por el financiamiento del proyecto "Fortalecimiento del sector panelero, mediante investigación e innovación agrícola y agroindustrial en el departamento de Nariño", los cuales sirvieron de base para este capítulo. De manera especial, agradecemos a los productores que nos brindaron su información y al equipo de AGROSAVIA que participó en la realización de las entrevistas con los productores en las diferentes regiones paneleras, así: Antioquia: Juan Gonzalo López; Boyacá: Richard Sánchez y Carlos González; Caldas: Iader Correa; Caquetá: Pablo Ramos, Mauricio Castro y

Yeraldine Vargas; Cesar: Pilar Bucheli, Estefanía Fajardo y Jairo Ulloa; Cundinamarca: Richard Sánchez y Carlos González; Huila: Pablo Ramos y Yeraldine Vargas; Nariño: Jacqueline Gavilanes; Norte de Santander: Pilar Bucheli, Estefanía Fajardo y Jairo Ulloa; Risaralda: Iader Correa; Santander: Richard Sánchez y Carlos González; Tolima: Kemis Sierra y Jhonny Guarnizo.

Referencias

Blazy, J.-M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., & Wery, J. (2009). A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agricultural Systems*, *101*(1-2), 30-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2009.02.004

Castellanos Domínguez, O., Torres Piñeros, L. M., & Flórez, D. H. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3408

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena#presentaciones-por-departamento

García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano Latorre, A., Santana, N. J., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13454

Hamelin, L., Møller, H. B., & Jørgensen, U. (2021). Harnessing the full potential of biomethane towards tomorrow's bioeconomy: A national case study coupling sustainable agricultural intensification, emerging biogas technologies and energy system analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *138*, artículo 110506. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110506

Kostov, B., Bécue-Bertaut, M., & Husson, F. (2015). Correspondence analysis on generalised aggregated lexical tables (CA-GALT) in the FactoMineR Package. *The R Journal*, *7*(1), 109-117. http://dx.doi.org/10.32614/rj-2015-010

León Sánchez, I. C., & Useche Cárdenas, L. F. (2018). *La producción de la caña de azúcar y panela, y la incidencia que esta práctica tiene en el nivel de vida de las familias productoras del municipio de Villeta, departamento de Cundinamarca* [tesis de maestría, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/maest_gestion_desarrollo/146/

Osorio Cardona, J. A., Martínez Lemus, E. P., Hio, J. C., Aguirre Rodríguez, J. E., Vergara Ávila, J. A., Luque Sanabria, N. Y., Rojas Zambrano, E. D., & Cruz Castiblanco, G. N. (2020). Caracterización sanitaria de los cultivos de granadilla, gulupa y maracuyá en Colombia, con especial referencia a la secadera causada por *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Parsons, V. L. (2017). Stratified sampling. En N. Balakrishnan, T. Colton, B. Everitt, W. W. Piegorsch, F. Ruggeri, & J. L. Teugels (Eds.), *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat05999.pub2

Ramírez Gil, J. G. (2017). Characterization of traditional production systems of sugarcane for panela and some prospects for improving their sustainability. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, *70*(1), 8.045-8.055. https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61763

Rodriguez, G., Garcia, H., Roa Diaz, Z., & Santacoloma, P. (2007). *Panela production as a strategy for diversifying incomes in rural area of Latin America* [AGSF: working document 6]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). https://www.fao.org/3/ap307e/ap307e.pdf

Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, *152*, 858-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127

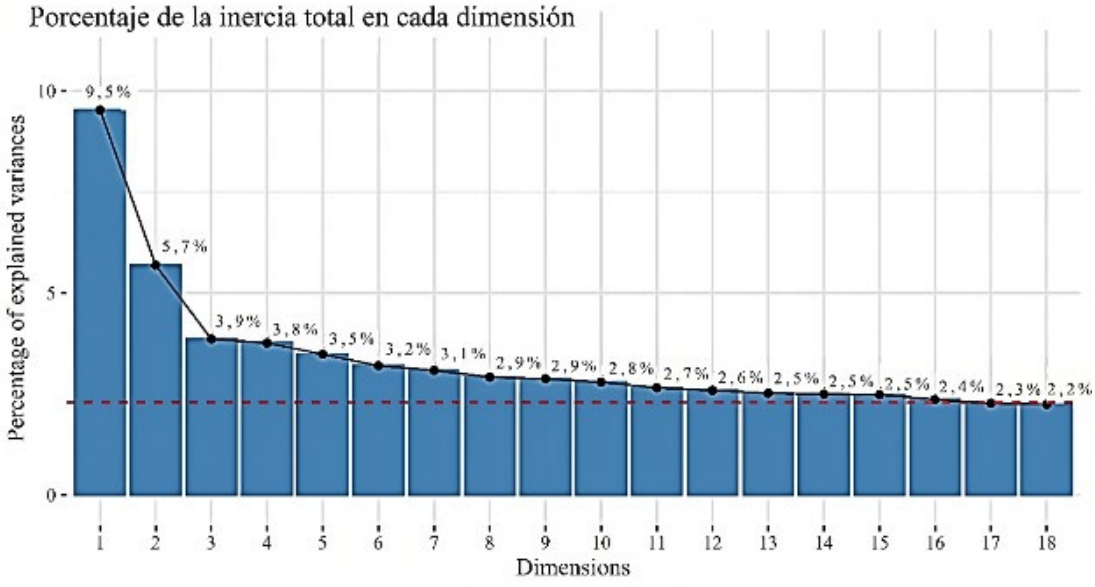
Saridakis, G., Georgellis, Y., Muñoz Torres, R. I., Mohammed, A.-M., & Blackburn, R. (2021). From subsistence farming to agribusiness and nonfarm entrepreneurship: Does it improve economic conditions and well-being? *Journal of Business Research*, *136*, 567-579. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.07.037

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2014). *Estudio de caracterización del sector agropecuario en Colombia* (tomo II).

Shukla, R., Agarwal, A., Gornott, C., Sachdeva, K., & Joshi, P. K. (2019). Farmer typology to understand differentiated climate change adaptation in Himalaya. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-12. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-56931-9

Anexos capítulo 18

Anexo 18.1. Porcentaje de varianza acumulada en el análisis factorial para datos mixtos (AFDM)



Fuente: Elaboración propia

Anexo 18.2. Comparación entre los tipos de UP de panela

Componente general

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396) %	Tipo II (*n* = 201) %	Tipo III (*n* = 162) %	Prueba chi-cuadrado-significancia
Departamentos	Cundinamarca	27,27	24,38	1,23	< 0,0001
	Boyacá	0,76	0,50	13,58	
	Caldas	10,10	7,96	0,62	
	Caquetá	2,78	4,48	0,00	
	Nariño	11,87	0,50	61,73	
	Tolima	16,67	5,97	0,00	
	Risaralda	3,03	4,98	2,47	
	Huila	20,20	4,48	3,09	
	Norte de Santander	4,80	11,44	0,62	
	Antioquia	1,77	31,34	4,94	
	Cesar	0,76	3,98	0,00	
	Santander	0,00	0,00	11,73	

Aspectos técnicos del cultivo

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Variedad de caña	Introducida	10,35a	25,37ab	40,74b	0,018
	Tradicional	89,65a	74,63ab	59,26b	
Tipo de fertilización	Orgánica	7,83a	29,35b	0,62a	< 0,0001
	Química	27,78a	20,90a	79,01b	
	Combinada (o/q)*	4,80a	17,91b	7,41a	
	Ninguno	59,60a	31,84b	12,96c	
Tipo de control fitosanitario	Biológico	11,87a	20,40b	37,04b	< 0,0001
	Cultural	5,56a	5,47a	4,32a	
	Ambos (b/q)*	1,26a	0,00a	4,94a	
	Químico	4,29a	8,46b	9,88b	
	Ninguno	77,02a	65,67a	43,83b	

(Continúa)

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Método de cosecha	Entresaque	74,24a	77,11a	10,49b	< 0,0001
	Parejo	17,93a	18,41a	88,89c	
	Parejo sin renovación	5,81a	1,49b	0,00b	
	Combinada (p/e)*	2,02ab	2,99b	0,62a	
Topografía	Pendiente	46,72a	60,70a	16,05b	< 0,0001
	Plana	5,56a	6,47a	14,20b	
	Ondulada	47,73a	32,84a	69,75b	
Control de malezas	Manual	66,92a	64,68a	11,73b	< 0,0001
	Ambos (m/q)*	27,27a	32,84a	55,56b	
	Ninguno	2,53a	0,50a	8,02b	
	Químico	3,28a	1,99a	24,69b	

* Combinada (o/q): orgánica y química; combinada (p/e): parejo y entresaque; ambos (b/q): biológico y químico; ambos (m/q): manual y químico.

Nota: Las letras junto a los valores denotan diferencias significativas entre cada tipo de UP.

Descripción de la planta de proceso

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Combustible del motor	Tracción animal	2,27a	0,50a	0,00a	< 0,0001
	Diésel	84,85a	60,20b	17,28c	
	Eléctrico	11,11a	34,33b	82,72c	
	Agua	0,51a	4,48a	0,00a	
	Gasolina	1,26a	0,50a	0,00a	
Tipo de cámara de combustión	Plana	80,81a	72,14b	81,48a	< 0,0001
	Plana mejorada	16,92a	21,89a	5,56b	
	Caldera	0,00a	1,00a	2,47a	
	Ward-Cimpa	2,27a	4,98a	10,49b	
Forma del casco	Pirotubular aleteado	2,02a	12,94a	3,70a	< 0,0001
	Tradicional-semiesférico	97,98a	87,06a	96,30a	

(Continúa)

Variable	Clase	Tipo I (*n*=396)	Tipo II (*n*=201)	Tipo III (*n*=162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Equipo prelimpiador de jugos	Tradicional	32,58a	29,35a	15,43b	<0,0001
	Acero inoxidable	14,39a	49,75b	74,69c	
	No	53,03a	20,90b	9,88b	
Aislamiento del área de secado del bagazo de caña	No	87,37a	73,13a	33,33b	<0,0001
	Sí	12,63a	26,87a	66,67b	
Aislamiento del área de batido y moldeo	No	87,88a	62,19b	25,31c	<0,0001
	Sí	12,12a	37,81b	74,69c	
Compra clarificante	No	92,42a	88,06a	33,95b	<0,0001
	Sí	7,58a	11,94a	66,05b	
Tipo de panela	Bloque y pulverizada	3,79a	5,97a	1,85a	0,0526
	Bloque	90,66ab	85,57b	95,06a	
	Bloque y pastilla	5,56a	8,46b	3,09a	
Flujo de jugos	Paralelo	58,59a	29,85b	63,58c	<0,0001
	A contra-corriente	28,54a	33,83b	8,02c	
	Mixto	12,88a	36,32b	28,40b	
Material de la falca	Convencional	78,79a	39,80b	28,40b	<0,0001
	Acero inoxidable	17,42a	54,73b	70,37c	
	Ninguno	3,79a	5,47a	1,23b	
Material de las cachaceras	Ninguno	19,70a	6,97a	9,88a	<0,0001
	Tradicional	75,00a	72,64a	33,33b	
	Acero inoxidable	5,30a	20,40b	56,79c	
Material de las meloteras	Acero inoxidable	0,00a	6,97b	5,56b	<0,0001
	Tradicional	17,68a	62,19b	25,93c	
	Ninguno	82,32a	30,85b	68,52c	
Picadora	No	89,65a	56,72b	95,06c	<0,0001
	Sí	10,35a	43,28b	4,94a	

Nota: Las letras junto a los valores denotan diferencias significativas entre cada tipo de UP.

Subproductos y residuos

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Uso de palma-cogollo	Animales	32,83a	84,58b	55,56a	< 0,0001
	No lo aprovecha	22,22a	8,46b	33,33a	
	Lote	44,95a	6,97b	11,11b	
Uso de bagacillo	Lo bota	79,29a	39,80b	54,94b	< 0,0001
	Compostaje	4,04a	29,85b	19,75b	
	Cultivo	15,40a	21,39a	21,60a	
	Melote + animales	1,26a	8,96b	3,70ab	
Uso de cachaza	Lo bota	41,41a	6,47b	6,17b	< 0,0001
	Cultivo	6,31a	6,97a	0,00a	
	Melote + animales	52,27a	86,57b	93,83b	
Uso de ceniza	Lo bota	42,68a	16,92b	46,91a	< 0,0001
	Compostaje	1,52a	2,99a	9,26b	
	Cultivo	55,81a	80,10b	43,83a	

Nota: Las letras junto a los valores denotan diferencias significativas entre cada tipo de UP.

Aspectos sociales

Variable	Clase	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	Prueba chi-cuadrado-significancia
Sexo del jefe del hogar	Masculino	84,34a	90,55b	93,83b	0,0032
	Femenino	15,66a	9,45b	6,17b	
Asociación agropecuaria	No	70,71a	60,20a	64,20a	0,2080
	Sí	29,29a	39,80a	35,80a	
Trabaja en la finca	No	17,42a	20,90a	6,17b	0,0004
	Sí	82,58a	79,10a	93,83b	
Contrata jornales	No	83,33a	73,13a	82,10a	0,385
	Sí	16,67a	26,87a	17,90a	
Nivel educativo	Ninguno	13,89a	17,41a	5,56b	0,0040
	Primaria	71,21a	64,68a	67,28a	
	Bachillerato	12,63a	15,92ab	24,69b	
	Técnico	1,77a	1,00a	1,85a	
	Universitario	0,51a	1,00a	0,62a	

Nota: Las letras junto a los valores denotan diferencias significativas entre cada tipo de UP.

Variables cuantitativas

Variable	Tipo I (*n* = 396)	Tipo II (*n* = 201)	Tipo III (*n* = 162)	*p* valor
Área de la UP (ha)	16,17 ± 2,23 a	30,42 ± 3,43 b	20,85 ± 2,58 a	0,0008
Área sembrada en caña de azúcar (ha)	4,5 ± 0,3 b	10,28 ± 1,68 a	10,64 ± 2,06 ab	0,0001
Importancia relativa del cultivo de caña de azúcar dentro de la UP (%)	52,76 ± 1,61 a	45,4 ± 2,10 b	58,89 ± 2,66 b	< 0,0001
Capacidad de producción por UP (kg/h)	70,78 ± 2,82 a	75,74 ± 3,97 b	127,52 ± 5,08 b	0,0003
Producción de panela por UP (t/año)	37,89 ± 2,80 a	53,15 ± 5,74 a	106,61 ± 10,7 b	< 0,0001
Edad del jefe del hogar (años)	52,82 ± 0,66 a	55,13 ± 0,87 a	55,8 ± 0,97 a	0,121

Nota: Las letras junto a los valores denotan diferencias significativas en $p < 0,0$, mediante análisis de varianza y comparación de medias de Tukey. Los valores hacen referencia al promedio de cada grupo.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 19

Implementación de un proceso de producción de piloncillo a nivel piloto como estrategia de capacitación de recursos humanos especializados

Abigail Reyes Munguía, Diana Beatriz Muñiz Márquez, Heriberto Ramírez Cathí y Jorge Enrique Wong Paz

Resumen

Este trabajo se enfocó en la implementación de una planta piloto de producción de piloncillo en el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, con el propósito de definir parámetros que tienen impacto en el proceso de producción, así como de lograr la capacitación de recursos humanos enfocada en la elaboración de piloncillo. En el presente proyecto se implementó una planta piloto para la elaboración de piloncillo desde la construcción de la paila y el horno. Posteriormente, se instruyó a estudiantes para producir piloncillo: estos recolectaron la materia prima, extrajeron el jugo de la caña de azúcar y lo concentraron hasta formar piloncillo; dicha capacitación se evaluó por medio de informes técnicos. De acuerdo con los resultados, se logró la producción de piloncillo a partir de caña de azúcar cultivada en la región Huasteca, del estado de San Luis Potosí. Durante el proceso de producción, se detectó que la temperatura de evaporación del jugo tuvo un impacto significativo en la coloración final del piloncillo. Por otra parte, los estudiantes que recibieron la capacitación del proceso de elaboración de piloncillo lograron adquirir conocimientos y habilidades técnicas, lo que permitió la formación de recursos humanos especializados. Se recomienda establecer un control estricto de la temperatura, el pH y el tiempo durante el proceso de producción de piloncillo

para garantizar su estandarización, así como continuar con las capacitaciones técnicas de estudiantes en procesos de elaboración de productos agroalimentarios.

Palabras clave: jugo de caña, producto agroalimentario, condiciones operacionales

Introducción

El piloncillo se define como un producto agroalimentario que resulta de la evaporación del jugo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.); es rico en azúcares, por lo que se considera un edulcorante alterno a la sacarosa. En ciertas regiones se lo denomina "azúcar morena" o "mascabado" (Martínez-González et al., 2019). La agroindustria panelera se ha insertado gradualmente en los mercados agrícolas; sin embargo, a nivel mundial, la producción de piloncillo se sigue dando en la ruralidad, de manera tradicional y artesanal. En Latinoamérica, los países productores de piloncillo son Colombia, Brasil, México, Guatemala, Venezuela, Haití, Perú, Ecuador, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Nicaragua, Panamá, República Dominicana, Bolivia y Argentina (Cuevas Reyes et al., 2017). En México, la producción de piloncillo es fluctuante, debido especialmente a que existen limitaciones en la mecanización del proceso; es decir, el piloncillo se elabora con una nula tecnificación y sin una regulación normativa aplicable al producto, si bien, por ejemplo, se cuenta con la Norma Mexicana NMX-F-596-SCFI-2016, sobre especificaciones y métodos de prueba, y con la Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, sobre la higiene e inocuidad alimentaria (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2009; Dirección General de Normas, 2016).

Aunado a esto, la producción del piloncillo es poco sustentable, debido a que aún no se ha logrado la estandarización del proceso de producción y tampoco se han definido las características idóneas para el producto elaborado; sin embargo, a pesar de esto, se estimó una producción anual de 30.000 toneladas

en 2017, siendo los principales estados productores San Luis Potosí, Veracruz, Nayarit y Colima (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018). En el estado de San Luis Potosí, la producción de piloncillo representa una de las principales fuentes económicas de pequeños productores y, en algunos casos, se ha llegado a convertir en el único sustento económico de las familias; además, ya que se estima que existen alrededor de 5.000 productores piloncilleros, esta actividad se considera de gran importancia (Cuevas Reyes, 2017). Entre los municipios productores de piloncillo en el estado de San Luis Potosí, se encuentran Tanlajás, San Antonio, Tancanhuitz de Santos, Tamazunchale, Huehuetlán, Tampamolón, Aquismón y Coxcatlán, todos pertenecientes a la región Huasteca. Sin embargo, la producción en estos municipios sigue siendo artesanal, posiblemente por la falta de recurso humano capacitado para la elaboración estandarizada de piloncillo.

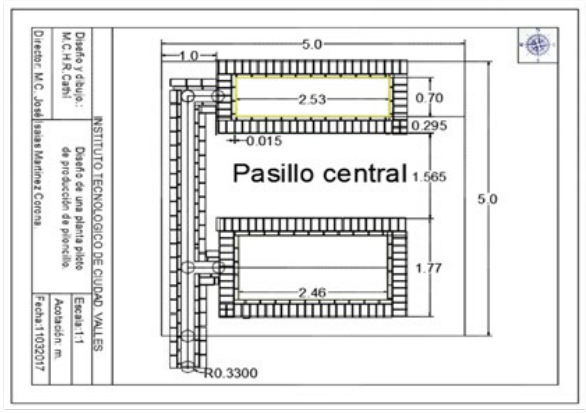
Ciudad Valles es el municipio de la Huasteca potosina con mayor número de habitantes y mayor oportunidad de formación de recursos humanos a nivel universitario, gracias a la presencia de un gran número de instituciones de educación superior. En este sentido, gran parte de la población joven de los municipios productores de piloncillo se ve en la necesidad de migrar a Ciudad Valles para su formación universitaria. Por lo tanto, el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles optó por atender la necesidad de capacitar a estudiantes en materia de producción de piloncillo, con la finalidad de que adquirieran conocimientos para retribuir a sus familias con la mejora de los procesos de producción de piloncillo y, como consecuencia, contribuir a la economía familiar derivada de esta actividad. El objetivo de este trabajo fue implementar una planta piloto de producción de piloncillo en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles para definir los parámetros que impactan en el proceso de producción y lograr la capacitación de recursos humanos especializados.

Metodología

Implementación de una planta piloto para la producción de piloncillo

Se implementó una planta piloto para el proceso de producción de piloncillo en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México. Para obtener el taller de industrialización de la caña de azúcar (planta piloto), se adecuó un taller especial de la industria alimentaria —el cual cuenta con paredes compuestas de azulejo blanco—, y se instaló el trapiche, dotado con masas de acero inoxidable grado alimenticio y un motor eléctrico de la marca Siemens, monofásico, de tres caballos de fuerza y una eficiencia nominal de 127 V. Por otra parte, se construyó la paila (evaporador abierto), cuyas dimensiones fueron de 2,5 m de largo, 0,7 m de ancho y 0,25 m de altura, con una capacidad de volumen máximo de 457 L; el material que se utilizó para la construcción de la paila fue acero inoxidable con espesor de 0,5 pulgadas. El horno fue construido en el exterior del taller, a base de ladrillo rojo de barro horneado, con dimensiones internas de 0,7 × 2,53 m; para su construcción, se utilizaron mallas de alambre y líneas de ladrillo de arcilla con una chimenea (3 m de altura) de acero inoxidable. En la figura 19.1 se muestran el diseño del horno y la chimenea final. Al respecto, de los dos hornos que se tenían contemplados, se concluyó la construcción de uno.

a.



b.



Figura 19.1. Planeación y proyección de la construcción del horno para producir piloncillo. a. Diseño del horno para la planta piloto de producción de piloncillo; b. Horno terminado con chimenea.

Fuente: Heriberto Ramírez Cathí
Foto: Jorge Enrique Wong Paz

Capacitación de recursos humanos en la producción de piloncillo a nivel piloto

La capacitación se dividió en cuatro etapas: 1) colecta y preparación de la materia prima, 2) obtención del jugo de caña, 3) elaboración de piloncillo (clarificación, evaporación y concentración) y 4) análisis de los productos finales elaborados (azúcares totales y reductores, y color). Las capacitaciones se impartieron a cuatro grupos conformados por treinta estudiantes de la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias del Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, y fueron coordinadas y supervisadas por un grupo de dos profesores con experiencia en producción y comercialización de piloncillo. El proceso de capacitación consistió en el análisis del problema, la planeación de la capacitación, su realización y la evaluación (García López, 2011). Cada grupo capacitado fue evaluado mediante informes técnicos, empleando una rúbrica de evaluación que contenía los criterios de recolección

y preparación de la materia prima, la identificación y control de puntos críticos en la elaboración de piloncillo y la determinación de la calidad del producto obtenido.

Para realizar las pruebas en la planta piloto instalada en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, se siguieron las condiciones reportadas por Martínez-González et al. (2019).

Recolección y preparación de la materia prima

El corte de la caña se realizó manualmente en el campo de cultivo ubicado en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, el cual cuenta con dos variedades de caña de azúcar: CP 72-2086 y MEX 73-1240. Los tallos de caña cortados (150 kg) fueron transportados dentro de las mismas instalaciones del Instituto hasta el área de la planta piloto; transcurridas dos horas después del corte, los tallos de caña de azúcar fueron lavados, y luego se realizó la extracción del jugo de la caña de azúcar en un trapiche mecánico de tres rodillos de acero inoxidable, con capacidad de molienda de una caña a la vez, adaptado con motor eléctrico, con lo cual se logró un 50 % de extracción de jugo en relación con el peso de la caña de azúcar. Posteriormente, el jugo de caña extraído fue filtrado con tela tipo manta, para eliminar los residuos de bagazo y partículas extrañas de gran tamaño. El jugo filtrado fue colectado y vertido directamente en la paila hasta alcanzar el volumen de operación (70 ± 10 L).

Al alcanzar el volumen de operación, las tres etapas de producción de piloncillo (clarificación, evaporación y concentración) se realizaron en la misma paila. Se utilizaron las dos variedades de caña por separado (MEX 73-1240 y CP 72-2086) para comparar la calidad del producto final.

Identificación y control de puntos críticos en la elaboración de piloncillo

Para la identificación de los puntos críticos en la clarificación, evaporación y concentración, se tomaron alícuotas de jugo y se analizaron en función del pH, los grados Brix y la temperatura de proceso. En la etapa de clarificación, para remover las impurezas iniciales (cachaza), el jugo de caña se llevó a una temperatura de 60 °C y se realizó el muestreo de los parámetros antes mencionados (pH y grados Brix). Cuando el jugo alcanzó los 100 °C (evaporación), se le agregaron 50 g de cal grado alimenticio como floculante, para la remoción de impurezas, y se midieron nuevamente los mismos parámetros (pH y grados Brix). De nuevo, se retiraron las impurezas residuales floculadas, y después de 30 min se añadieron 100 g de manteca vegetal (antiespumante). El proceso fue monitoreado cada 30 min, manteniendo la temperatura de punteo a 100 ± 5 °C (concentración), hasta la obtención del producto final (piloncillo). El proceso tuvo una duración de 3 h.

Determinación de la calidad del producto obtenido

La determinación de la calidad del piloncillo se basó en la medición del contenido de azúcares reductores y totales mediante espectrofotometría: para azúcares reductores, por el método del ácido 3,5-dinitrosalicilico (DNS) (Miller, 1959), y para azúcares totales, por el método de Antrona (Dreywood, 1946). Se determinó el color del piloncillo por el método CIELAB, utilizando el *software* InteliColor. Este método mide el espacio de color tridimensional (LAB), determinado por la Comisión Internacional de la Iluminación (Khan et al., 2009), así: L: luminosidad de negro a blanco; A: de rojo a verde; B: de azul a amarillo. El *software* examina las imágenes que captura y evalúa los parámetros de color L*a*b*. Para la medición del color, se utilizaron cinco piloncillos (de 250 g cada uno, aproximadamente) de cada variedad evaluada (MEX 73-1240 y CP 72-2086). De acuerdo con Martínez González et al. (2017), el análisis es programado para la definición de diez grupos o colores en cada imagen segmentada, para, posteriormente, realizar una discriminación de los diez colores, dejando por fuera

los que tengan una representatividad menor al 10 %, y de los colores restantes se obtiene el promedio ponderado L*a*b* de las muestras de piloncillo.

Resultados y discusión

Inspección de la construcción del horno para la producción de piloncillo

Se logró la construcción del horno funcional según los planos desarrollados durante la etapa de diseño. Del mismo modo, la paila resultó eficiente para el proceso, ya que resistió las altas temperaturas, además de que fue fabricada con un material inocuo, como lo es el acero inoxidable. En la figura 19.2 se muestran el horno y la paila en funcionamiento.



Figura 19.2. Puesta en marcha del horno para producir piloncillo. a. Vista lateral del horno (entrada de alimentación del fuego); b. Paila con jugo de caña de azúcar instalada en el horno para la producción de piloncillo.

Fotos: Heriberto Ramírez Cathí

Capacitación de recursos humanos en la producción de piloncillo

Con base en los resultados de la evaluación de los informes técnicos elaborados por los estudiantes capacitados, se puede mencionar que un 95 % demostró tener los conocimientos referentes al proceso de recolección y preparación de la caña de azúcar para la obtención del jugo, mientras que solo un 75 % comprendió la importancia de identificar y controlar la temperatura, la cantidad de floculante y el tiempo de proceso como puntos críticos durante la elaboración de piloncillo. Por otra parte, el 85 % de los estudiantes capacitados logró determinar la calidad del producto final.

Dichos resultados funcionan como indicadores del alcance de la capacitación y evidencian que los estudiantes están preparados para resolver problemáticas del proceso de producción de piloncillo a través del análisis, comprensión y aplicación de los conocimientos en los principales factores que intervienen en la obtención de un producto de calidad en lote de producción. En la figura 19.3 se muestran las actividades de las capacitaciones proporcionadas a los estudiantes sobre el proceso de obtención del jugo de caña y la elaboración de piloncillo.

García López (2011) menciona que la capacitación de personal permite un mayor acceso al capital y a las innovaciones tecnológicas, lo que brinda mayores ventajas competitivas. Por otra parte, las capacitaciones constantes promueven la seguridad y salud en el trabajo. De acuerdo con los resultados obtenidos tras la evaluación de la capacitación de los estudiantes para la elaboración de piloncillo, se considera que son competentes para realizar este proceso de manera segura y eficaz.



Figura 19.3. Capacitación en elaboración de piloncillo. a. Selección de la materia prima; b. Limpieza de la materia prima; c. Extracción del jugo de caña de azúcar con el trapiche; d. Encendido del horno; e. Llenado de la paila con el jugo de caña de azúcar; f. Procesamiento del jugo de caña para obtener piloncillo; g. Recuperación del piloncillo.

Fotos: Heriberto Ramírez Cathí y Jorge Enrique Wong Paz

Determinaciones analíticas del piloncillo

Se observó que un pH de 5 en el jugo resultó óptimo para lograr la calidad deseable en el piloncillo; sin embargo, cabe resaltar que con la adición de cal hubo un incremento en el pH de hasta 6, pero después de tres horas de proceso se observó una disminución y estabilización del pH en 5. En cuanto a la concentración de sólidos totales, se observó un incremento de estos en función del tiempo y la temperatura. El jugo, inicialmente, presentó 20 °Bx, y durante los primeros 100 min de proceso solo existió un incremento de 4 °Bx en el jugo. Esto se relaciona con la temperatura de proceso, así: durante los primeros 40 min de proceso, la temperatura osciló alrededor de los 30 °C; luego, entre los 40 y 100 min, la temperatura incrementó de 30 a 90 °C. Es por ello que, entre los 100 y 180 min,

se presentó un incremento exponencial en la concentración, alcanzando un máximo de 80 °Bx. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Martínez-González et al. (2019), quienes reportan el efecto del uso de cal en la elaboración de piloncillo, ya que esta regula el pH y controla la formación de azúcares invertidos durante la clarificación del jugo de caña de azúcar. Asimismo, mencionan que la temperatura juega un papel importante durante la elaboración, pues temperaturas mayores a los 100 °C generan el aumento de los grados Brix en menor cantidad de tiempo, lo cual limita los cambios de coloración derivados de la caramelización de los azúcares. Por su parte, Quezada-Moreno et al. (2015) reportan que un factor por considerar para la regulación de la temperatura durante el proceso de elaboración de piloncillo es la altitud en la cual se localiza la planta panelera, debido a cambios en el punto de ebullición del jugo de caña. Los autores reportan, para la producción de piloncillo, temperaturas entre 115 y 125 °C a 200 m s.n. m.; sin embargo, Ciudad Valles, donde se realizó este proyecto, se encuentra a 70 m s. n. m., lo cual ocasiona que el proceso de elaboración requiera más tiempo para lograr evaporar y concentrar el jugo de caña a una temperatura de 100 °C.

En cuanto al rendimiento de producto, se observó que la capacidad de producción experimental de piloncillo fue de $2{,}6 \pm 0{,}2$ kg/h, lo cual equivale a 20,8 kg por jornada laboral de ocho horas, tras moler 150 kg de caña de azúcar, lo que, expresado en porcentaje, corresponde al 13,8 % del peso inicial de la materia prima. Con base en los resultados, se logró obtener piloncillo utilizando las dos variedades de caña (MEX 73-1240 y CP 72-2086), sin diferencia significativa en el rendimiento entre ellas. Por su parte, Reyes Cárcamo (2019) reporta, para una producción de piloncillo a nivel industrial, un rendimiento de 2,5 toneladas, resultado de una molienda de 25 toneladas de caña de azúcar por día, es decir, un 10 % del peso inicial de la materia prima; en este caso, la diferencia de rendimiento radica principalmente en la capacidad de molienda de los trapiches, el rendimiento que tenga el jugo de la caña de azúcar y el personal que se encuentre trabajando.

Respecto al contenido de azúcares reductores de los piloncillos elaborados con las dos variedades de caña (MEX 73-1240 y CP 72-2086), se obtuvieron valores del 73 y el 56 %, respectivamente. La cantidad de azúcares reductores en el piloncillo afecta de manera considerable la consistencia del producto final (Mujica et al., 2008). Los azúcares reductores no se cristalizan y, a su vez, ejercen un efecto inhibitorio en la cristalización de la sacarosa (Badui Dergal, 1995), razón por la cual una concentración elevada de azúcares reductores en el piloncillo afecta principalmente la dureza como parámetro de calidad en el producto final; así pues, a mayor concentración de azúcares reductores, menor es la firmeza del producto. Tomando en consideración lo anterior, es indispensable monitorear la concentración de azúcares reductores en todas las etapas del proceso, para evitar la hidrólisis de la sacarosa contenida en el jugo.

En cuanto a los azúcares totales, se observó alrededor del 70-71 % de azúcares, independientemente del tipo de caña utilizada. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Galicia-Romero et al. (2017), ya que ellos reportan un valor del 69 %, y de acuerdo con lo mencionado por Solís Pacheco et al. (2006), los valores de azúcares reductores totales en muestras de piloncillo pueden variar entre el 71 y el 82,6 %, rango en el cual están los valores obtenidos en esta investigación. La hidrólisis que sufre la sacarosa está relacionada con los azúcares reductores respecto a los azúcares totales, parámetros que aumentan en las etapas en las que se incrementa la temperatura de forma considerable durante el proceso, y esto se debe al fácil rompimiento del enlace glucosídico bajo las condiciones empleadas, ya que es un enlace débil (Solís Pacheco et al., 2006).

Con respecto a la determinación del color, los resultados de las muestras del piloncillo se detallan en la tabla 19.1. En la tabla se pueden apreciar las diferencias en los tonos. El color obtenido para la variedad MEX 73-1240 fue marrón amarillento grisáceo oscuro, mientras que para la variedad CP 72-2086 fue marrón anaranjado profundo, lo que demuestra que la variedad de caña

utilizada para la elaboración de piloncillo es un factor importante en el impacto de este parámetro físico.

Tabla 19.1. Colores L*a*b* de dos muestras de piloncillo (una por cada variedad utilizada)

Muestra	L*	a*	b*	Color
MEX 73-1240 	31,7	2,9	10,2	
CP 72-2086 	40,8	5,7	17,7	

Fuente: Elaboración propia

Es importante considerar que en el proceso de elaboración de este producto, y también durante el almacenamiento, se lleva a cabo una reacción química llamada “reacción de Maillard”, la cual es favorecida por el aumento de la temperatura; esta se caracteriza por involucrar la interacción entre aminoácidos y azúcares, lo que altera el color al ocasionar un pardeamiento por los compuestos llamados “melanoidinas”, así como por la

acrilamida (Sung et al., 2020). Martínez González et al. (2017), tras evaluar diferentes muestras de piloncillo, mencionan que el color es la principal característica para evaluar la calidad del producto, y reconocen tres categorías (bueno, regular y malo): entre mayor sea la oscuridad de los tonos del producto, peor se considera su calidad. Del mismo modo, Jimenez-Hernández et al. (2015) mencionan que las condiciones de elaboración, como la extracción, el pH y, principalmente, la temperatura durante la cocción, modifican la coloración del producto terminado, la cual tiene impacto en su comercialización. Estas alteraciones pueden ser observadas hasta un año después de su elaboración, cuando el producto está almacenado (Payet et al., 2005).

Conclusiones

Con la implementación de la planta piloto en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles (México), se logró desarrollar el proceso de elaboración del piloncillo a nivel piloto. Además, se logró la capacitación de un grupo de treinta estudiantes en la identificación del efecto de los principales factores para la elaboración de piloncillo, que influyen directamente en la calidad del producto terminado, lo cual está ligado con la "aceptabilidad" percibida por el mercado. Asimismo, se espera que dicha capacitación permita que los estudiantes puedan apoyar a los productores piloncilleros de la región mediante un asesoramiento técnico sobre la mejora en el proceso de producción artesanal de piloncillo.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, por el apoyo brindado para la implementación de la planta piloto para la producción de piloncillo.

Referencias

Badui Dergal, S. (1995). *Química de los alimentos*. Alambra.

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2009). NOM-251-SSA1-2009. Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168389/FOLLETO_ALIMENTOS_NOM-251.compressed.pdf

Cuevas Reyes, V., Baca del Moral, J., Borja Bravo, M., Grass Ramírez, J. F., & Rivera Martínez, G. (2017). Agricultura familiar y tecnología para la elaboración de piloncillo granulado en la comunidad de Aldzulup Poytzén, San Luis Potosí. *Nova Scientia*, *9*(19), 481-501. https://doi.org/10.21640/ns.v9i19.955

Dirección General de Normas. (2016). NMX-F-596-SCFI-2016. Piloncillo 100 % de jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) - Especificaciones y métodos de prueba. https://docplayer.es/211256067-Norma-mexicana-nmx-f-596-scfi-piloncillo-100-de-jugo-de-cana-de-azucar-saccharum-officinarum-l-especificaciones-y-metodos-de-prueba.html

Dreywood, R. (1946). Qualitative test for carbohydrate material. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, (18), 499-505.

Galicia-Romero, M., Hernández-Cázares, A. S., Debernardi de la Vequia, H., Velasco-Velasco, J., & Hidalgo-Contreras, J. V. (2017). Evaluación de la calidad e inocuidad de la panela de Veracruz, México. *Agro Productividad*, *10*(11), 35-40. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/68/64

García López, J. M. (2011). El proceso de capacitación, sus etapas e implementación para mejorar el desempeño del recurso humano en las organizaciones. *Contribuciones a la Economía*, *12*, 1-18.

Jimenez-Hernández, M., García-Castillo, L. A., Martínez-Aguilar, M., & López-Serrano, M. (2015). Parámetros de calidad en la producción de piloncillo en Sabanas Huatusco, Veracruz. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, *2*(2), 319-329. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol2num2/Ciencias%20Naturales%20y%20Agropecuarias%20Vol%202%20Num%202%20Final_26.pdf

Khan, M. A. I., Ueno, K., Horimoto, S., Komai, F., Someya, T., Inoue, K., & Ono, Y. (2009). CIELAB color variables as indicators of compost stability. *Waste Management*, *29*(12), 2.969-2.975. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.021

Martínez González, E., Múñiz Márquez, D. B., Lárraga Altamirano, H. R., & Wong Paz, J. E. (2017). Análisis de espacio de color CIELAB de piloncillo elaborado en la Huasteca potosina. *Tectzapic*, *4*(1), 64-68. http://hdl.handle.net/20.500.11763/tectzapic1801piloncillo

Martínez-González, E., Muñiz-Márquez, D. B., De la Rosa-Hernández, M., Aguilar-Zárate, P., Reyes-Luna, C., Ramírez-Cathí, H., & Wong-Paz, J. E. (2019). Estudio de factores que influyen en la producción de piloncillo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) empleando un diseño de Plackett Burman. *Acta Universitaria*, *29*. http://doi.org/10.15174/au.2019.2 18 8.

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, *31*(3), 426-428. https://doi.org/10.1021/ac60147a030

Mujica, M. V., Guerra, M., & Soto, N. (2008). Efecto de la variedad, lavado de la caña y temperatura de punteo sobre la calidad de la panela granulada. *Interciencia*, *33*(8), 598-603. https://www.redalyc.org/pdf/339/33933808.pdf

Payet, B., Sing, A. S. C., & Smadja, J. (2005). Assessment of antioxidant activity of cane brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging assays: Determination of their polyphenolic and volatile constituents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(26), 10.074-10.079. https://doi.org/10.1021/jf0517703

Quezada-Moreno, W., Gallardo-Aguilar, I., & Quezada-Torres, W. (2015). Temperatura y concentración del jugo de caña según pisos climáticos en Ecuador. *Icidca: Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *49*(1), 17-21. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223136961003

Reyes Cárcamo, Y. (2019). *Evaluación de la influencia de los tiempos de cocción y de batido sobre el piloncillo artesanal* [tesis de grado, Universidad Veracruzana]. https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49405/ReyesCarcamoYanitzia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, 19 de julio). Piloncillo: endulzante artesanal que conquista el paladar. https://www.gob.mx/siap/articulos/piloncillo-endulzante-artesanal-que-conquista-el-paladar?idiom=es

Solís Pacheco, J. R., Pérez Martínez, F., Orozco Ávila, I., Flores Montaño, J. L., Ramírez Romo, E., Hernández Rosales, A., & Aguilar Uscanga, B. (2006). Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de caña de azúcar. *e-Gnosis*, (4). https://www.redalyc.org/pdf/730/73000401.pdf

Sung, W.-C., Chi, M.-H., Chiou, T.-Y., Lin, S.-H., & Lee, W.-J. (2020). Influence of caramel and molasses addition on acrylamide and 5-hydroxylmethylfurfural formation and sensory characteristics of non-centrifugal cane sugar during manufacturing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*(12), 4.512-4.520. https://doi.org/10.1002/jsfa.10492





Capítulo 20

Sostenibilidad de la producción de piloncillo en México

Noé Aguilar Rivera y Luis Alberto Olvera Vargas

Resumen

El piloncillo mexicano, o panela, es un edulcorante antiguo producido en regiones de alta marginación y pobreza, y para su diagnóstico como agroindustria existe una carencia de información académica, estadística y legislativa actualizada para la toma de decisiones. Sin embargo, este producto tiene grandes potencialidades para incrementar su cadena de valor. El objetivo de este trabajo fue describir y analizar los factores que impactan en la transición a la sostenibilidad de la agroindustria del piloncillo en México, empleando una metodología multidisciplinaria de análisis de literatura y trabajo de campo con actores; evaluando aspectos geográficos, tecnológicos y socioeconómicos con datos oficiales, y analizando investigaciones reportadas en diversos medios académicos. El piloncillo mexicano debe restructurar el proceso productivo de materia prima con énfasis en el cultivo agroecológico u orgánico; tecnificar la producción para obtener diversos productos, tamaños de calidad e inocuidad homogénea de valor comercial; aplicar legislación vigente y gestionar la propia, e incorporar otras opciones, como el turismo agroindustrial, para su sostenibilidad.

Palabras clave: agroindustria, productividad, factores limitantes, oportunidades

Introducción

La producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y sus derivados es una de las principales agroindustrias en países en desarrollo. En México, sexto productor mundial de esta gramínea, se producen los tallos para cuatro propósitos: forrajero y frutal (0,66 %), para semilla (0,2 %), industrial (98,1 %) y para piloncillo (1,04 %). En la zafra 2020/2021, se industrializaron 789.996 ha, con un rendimiento promedio de 64,93 t/ha, con una molienda de 51.292.545 t de caña, para obtener una producción de sacarosa de 5.715.448 t (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [Conadesuca], 2021). Con relación a la caña de azúcar para la producción de piloncillo o panela, a nivel nacional existen 12.100 ha, distribuidas principalmente en los estados de Veracruz, San Luis Potosí, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Puebla y Sonora, con cosechas de 316.800 t, un rendimiento promedio de 31,6 t/ha y un valor de la producción de 8,3 millones de dólares (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018).

En relación con lo anterior, en México se presenta una diferencia importante en el nivel de consumo de edulcorantes per cápita. Para piloncillo, se estima un consumo de 0,5 kg; para azúcar de caña (blanca popular, estándar, mascabada, etc.), de 36,7 kg, aunque los nuevos edulcorantes, como azúcar de palma, coco, estevia, fruto del monje y, principalmente, jarabe de maíz de alta fructosa están desplazando a los derivados de la caña de azúcar (De la Cruz & Garduño, 2021).

Sin embargo, las cifras de producción de caña de azúcar para piloncillo son fluctuantes debido al nulo interés de los Gobiernos locales, regionales y estatales por sistematizar los datos de producción y la tipología de los productores; además, la producción enfrenta grandes dificultades, como el bajo desarrollo y caracterización de variedades de caña mejoradas, el cultivo de secano y en suelos de baja calidad, los impactos ambientales por la quema de cañaverales, la nula inversión en infraestructura, los

altos costos de producción, la legislación cañera sin aplicación a la producción de piloncillo y la falta de organización y capacitación de los productores (Figueroa-Rodríguez et al., 2016).

Por otra parte, el piloncillo en México se considera aún una artesanía que se produce por la intensa deshidratación o concentración del jugo de caña de azúcar sin centrifugación (Gómez-Narváez et al., 2019). Sin embargo, el piloncillo procede principalmente de materia prima no comprada por ingenios azucareros, es decir, una caña residual, delgada, con alto contenido de fibra, de baja calidad agroindustrial, producida en comunidades de alta marginación social, en regiones indígenas o lomeríos sin acceso a infraestructura civil o logística. El jugo es previamente clarificado, concentrado y moldeado, y tradicionalmente comercializado con diferentes calidades, tonalidades, formas y tamaños (en bloque, granulado o pulverizado) (Lárraga Altamirano et al., 2017). Este producto alimenticio puede considerarse un edulcorante antiguo de alto valor agregado, ya que contiene compuestos beneficiosos para la salud humana (Flórez-Martínez et al., 2021). También, el piloncillo presenta propiedades organolépticas y un valor nutricional superior al de la sacarosa obtenida en ingenios azucareros. Sin embargo, no se incentiva entre los productores de piloncillo la elaboración de otras presentaciones diferentes al cono grande (figura 20.1), granulado o pulverizado (convencional u orgánico), u otros productos artesanales como jarabes, bebidas y destilados.

De acuerdo con Galicia-Romero et al. (2017), el piloncillo mexicano puede presentar diferentes calidades y colores según la región productora, la tecnología de molienda, la incorporación o no de sustancias químicas o naturales —como aditivos—, el material de construcción del trapiche y el proceso de calentamiento y secado-solidificación. El proceso de producción, por lo general, no cuenta con medidas de control de calidad, como buenas prácticas de manufactura y medición de parámetros fisicoquímicos en las etapas de extracción del jugo de caña, concentración del jugo (o meladura) y producto final, para asegurar la homogeneidad, calidad e inocuidad del producto.



Figura 20.1. Piloncillo mexicano tipo cono grande según la calidad (negro, trigueño, café y blanco).

Foto: Noé Aguilar Rivera

Así, el objetivo de este trabajo fue describir y analizar los factores que impactan en la transición a la sostenibilidad de la agroindustria del piloncillo en México, empleando una metodología multidisciplinaria de análisis de literatura y trabajo de campo con actores; evaluando aspectos geográficos, tecnológicos y socioeconómicos con datos oficiales, y analizando investigaciones reportadas en diversos medios académicos.

Metodología

De acuerdo con Koutsos et al. (2019), se hizo una revisión integral como método estructurado para examinar la literatura académica, identificando artículos científicos, libros y capítulos de libro potencialmente elegibles en bases de datos como Web of Science, Scopus, PubMed y Google Scholar, empleando palabras clave como "piloncillo", "panela", "non centrifuged sugar", "Mexican piloncillo", entre otras, en el contexto mexicano e internacional, en relación con tecnología de producción, actividades económico-productivas, sostenibilidad y aspectos legales. El trabajo de campo se llevó a

cabo con técnicas participativas, en municipios productores de la región Huasteca expertos en elaborar piloncillo con diversos niveles tecnológicos, utilizando una guía de entrevista semiestructurada y el método de bola de nieve (Noy, 2008), lo que permitió delimitar los factores que impactan en la cadena de valor del piloncillo en México, según lo propuesto por Cabrera Martínez y Aguilar Rivera (2019).

Resultados y discusión

Agroindustria del piloncillo

El piloncillo mexicano (del náhuatl *chiancaca*, "azúcar morena") se ha producido en la región central del estado de Veracruz desde la introducción del cultivo de la caña de azúcar en el año 1519 y el establecimiento del primer "trapiche" de madera en 1524 por Hernán Cortes, conquistador español (Aguilar-Rivera & Olvera-Vargas, 2021). Actualmente, aún existen trapiches en diversos municipios que trabajan con muy bajos niveles tecnológicos y con caña de muy baja calidad, lo que implica un mayor esfuerzo para mejorar los productos finales y optimizar sus procesos (Cabrera Martínez & Aguilar Rivera, 2019). El estado de Veracruz es el principal productor de caña de azúcar en México, el primero en azúcar y el tercero en piloncillo, que se produce en 105 municipios. En contraste, San Luis Potosí es el principal productor de piloncillo, con 17 municipios de la región Huasteca, principalmente Tanlajás, San Antonio, Huehuetlán, Tancanhuitz, Aquismón, Tampamolón, Tamazunchale y Coxcatlán (figura 20.2).

Los componentes de los molinos son maquilados en hierro fundido, y los de madera o piedra que aún existen se usan en la producción de melados (miel de trapiche), aguardiente o jugos para consumo directo por parte de la familia de los productores y vecinos (figura 20.3).

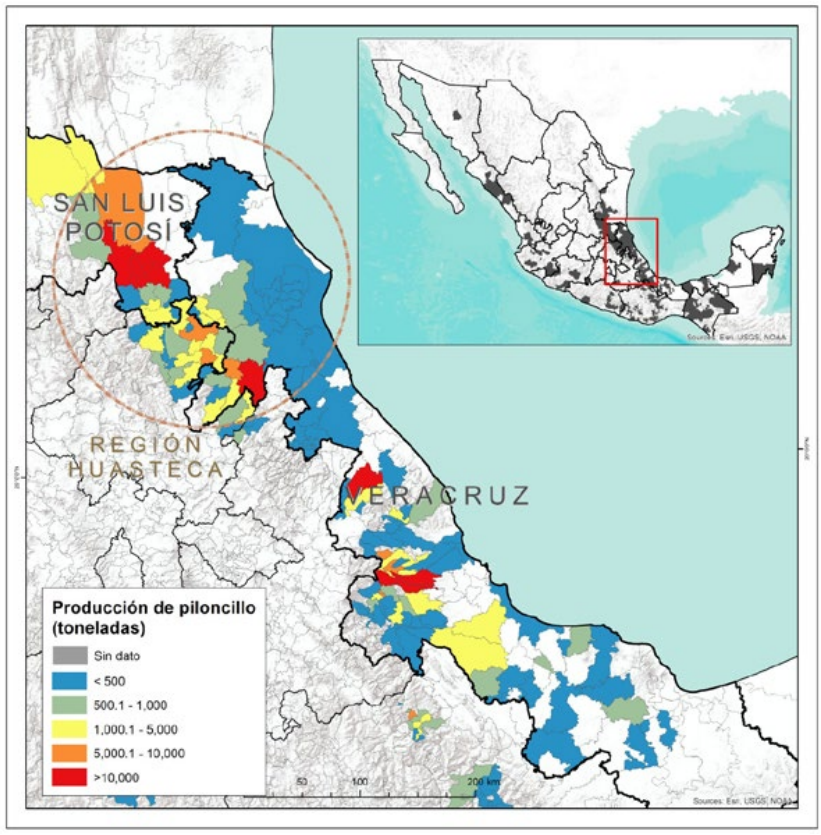


Figura 20.2. Producción de piloncillo en la región Huasteca, San Luis Potosí y Veracruz (México).

Fuente: Elaboración propia con base en SIAP (s. f., 2009)

La agroindustria piloncillera en México es, por lo general, una actividad de supervivencia rural, tradicional y artesanal, y se caracteriza por una producción poco organizada, con baja tecnificación, certificación de calidad y sostenibilidad, en la cual no se lleva a cabo un control de las operaciones técnicas de proceso ni se tienen en cuenta especificaciones de calidad del producto terminado, al no existir políticas públicas para su regulación y para la creación de una cadena de valor (Galicia-Romero et al., 2017).



Figura 20.3. Antigua hacienda piloncillera en Córdoba, Veracruz.

Foto: Noé Aguilar Rivera

Adicionalmente, la falta de difusión de los valores nutricionales y medicinales del piloncillo, sumada a sus tradicionales formas geométricas obsoletas y de bajo nivel comercial, que hacen que se requieran nuevos diseños para darle mayor valor de mercadotecnia, han generado que este producto no pueda competir con el azúcar blanca proveniente de los ingenios. Esta problemática de mercado ha generado que los trapiches no operen de forma continua, por lo que los productores de las zonas rurales

sobreviven de la producción, venta e industrialización de la caña de azúcar de forma estacional (Baca del Moral, 1995).

De acuerdo con Arias Ramírez y Valenciano Salazar (2017), la producción de piloncillo se da en una agricultura más local y rural, basada generalmente en el núcleo familiar, a pequeña y mediana escala, con una orientación de mercado local, lo que hace que, por sus características, genere procesos más sostenibles y con mayor impacto sobre la calidad de vida de la población local, que conserva acervos culturales.

La provisión de materia prima es combinada, pues se da con producción propia y con caña comprada; el rendimiento de piloncillo es medio, y la tecnología es intermedia o baja en la mayoría de los casos. Por lo tanto, el piloncillo en México se estructura como una agroindustria de supervivencia, en la cual se reflejan diversas problemáticas, como 1) el bajo uso de tecnología y el deficiente manejo del cultivo, la cosecha, el transporte y la transformación, lo que afecta la calidad del piloncillo; 2) la estacionalidad de la producción y la competencia con el azúcar y otros edulcorantes como productos sustitutos, lo cual incide en los precios de venta; 3) la débil cultura de asociatividad y empoderamiento de los productores; 4) la poca capacidad de articulación entre los actores de la cadena de valor, lo que afecta la organización gremial de los piloncilleros, y, por último, 5) la falta de estrategias comerciales y de mercadotecnia (Nieto Rivera & Cruz Carrasco, 2016).

Los principales centros de consumo de piloncillo se encuentran en Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara. Los actores directos de esta agroindustria son los productores de caña para ingenios azucareros y de caña piloncillera, los dueños de los trapiches y los intermediarios del sistema de transporte de la caña y del producto final en todas sus presentaciones (Servín Juárez et al., 2018).

Legislación de la agroindustria del piloncillo mexicano

Anteriormente, el Decreto Cañero de 1943, expedido el 29 de marzo de 1944, fijaba el precio de la caña para la fabricación de azúcar, alcoholes, aguardiente y piloncillo que se producía en los trapiches (Secretaría de Gobernación [Segob], s. f.).

Los productores de caña tenían una participación del 25 % del valor neto de las mieles finales, y el mismo valor en la producción de alcohol. Los precios los determinaba la Unión Nacional de Productores de Azúcar, que tenía a su cargo la venta y comercialización del azúcar, las mieles finales y el alcohol. También había un precio para el piloncillo que se producía en los trapiches.

Posteriormente, el Decreto Cañero del 24 de octubre de 1975 declaró de interés público la siembra, cultivo, cosecha e industrialización de la caña de azúcar. En sus considerandos, se establece incrementar la producción de artículos de primera necesidad o de consumo necesario (azúcar), el pago de la materia prima (caña), que la zona de influencia del ingenio se constituya como una unidad económica agrícola que permita abatir los costos (zonas de abastecimiento), el pago total de la caña por un solo concepto y en relación con su calidad derivada del contenido de sacarosa, sin considerar otros usos para la caña, como el piloncillo y el alcohol (Segob, s. f.).

Actualmente, el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (Pronac), en sus versiones 2007-2012, 2014-2018 y 2021-2024, así como la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar de 2005 del Gobierno Federal, no consideran al piloncillo como parte de la cadena de valor de la agroindustria de la caña de azúcar de México. Por lo tanto, actualmente no hay una legislación para la cadena de valor del piloncillo mexicano.

Producción de piloncillo

De acuerdo con Nieto Rivera y Cruz Carrasco (2016), entre los factores por considerar en la determinación de la productividad de un trapiche como sistema socioeconómico rural, se tienen los siguientes:

1. Superficie cañera cultivada por unidad productiva (rancho o terreno): los terrenos, por lo general, tienen una superficie menor a 1 ha y están ubicados en laderas.
2. Rendimiento de campo o agroindustrial de tallos de caña y sacarosa en jugo: la productividad se ubica alrededor de 20-30 t/ha, debido a que se emplean variedades o cultivares muy antiguos o porque no hay ningún tipo de manejo del cultivo, por lo que se presenta una baja calidad de la materia prima.
3. Frecuencia de molienda en los trapiches (número de moliendas por año, con duración semanal o diaria): depende exclusivamente de la temporada de festividades religiosas de fin de año. La molienda comienza en octubre y termina en febrero.
4. Producción de tipos de piloncillo, tecnología empleada, normatividad sanitaria aplicada y manejo de subproductos: dependen del mercado; regionalmente, se produce piloncillo con baja tecnología, y para la exportación, en menor grado, se emplean altas tecnologías y normas sanitarias y de calidad, como la NMX-F-596-SCFI-2016, "Piloncillo 100 % de jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) - Especificaciones y métodos de prueba".
5. Calidad del piloncillo (baja, media y alta): aún no existe una norma oficial mexicana regulatoria, por lo que la variabilidad es alta.
6. Empaquetado, etiquetado, almacenamiento y vida en anaquel: es determinado por el lugar de fabricación, la fecha y el mercado de destino.
7. Mercado de destino (local, regional, nacional o internacional).

En cuanto al proceso convencional aplicable en México, Ferrer Cruz et al. (2013) y Solís Pacheco et al. (2006) concluyen que para obtener 1 t de piloncillo se requieren de 10 a 12 t de materia prima (caña de azúcar). Se diferencian tres fases técnicas: a) extracción del jugo de la caña mediante la molienda; b) evaporación del jugo de la caña con bagazo como combustible, y c) moldeado del piloncillo. La vida de anaquel del piloncillo, como producto final, es de 7-8 meses, dependiendo de las condiciones ambientales y de la infraestructura del lugar de almacenamiento.

Los compradores de piloncillo demandan que este se encuentre en cajas de cartón con capacidad de 28 a 30 kg. Se comercializa, según los productores de diversas regiones de México, en tres presentaciones, tipos, calidades o colores de piloncillo, de lo cual depende su precio de venta. El piloncillo moreno es el de más baja calidad; el piloncillo comercial, de color café, es de calidad intermedia; el piloncillo de primera, de color claro y consistencia dura, es el de mejor calidad. Así pues, la calidad del piloncillo se mide por su color y textura: a mayor claridad y dureza, mejor producto (Galicia-Romero et al., 2017).

Se ha demostrado que el piloncillo tiene propiedades medicinales y una actividad antioxidante potencial debido a la presencia de compuestos polifenólicos en el jugo de caña (Zidan & Azlan, 2022). Sin embargo, la producción piloncillera, si bien proporciona beneficios al medio rural, se encuentra aislada al no contar con una adecuada asistencia técnica, tecnológica o financiera, tanto en producción como en transformación, y en muchas regiones su producción es marginal.

Las variaciones durante el proceso de producción son las que dan origen a uno u otro tipo de piloncillo, siendo el negro o industrial el de mayor producción, pues su proceso es menos complejo y más económico; su presentación es el tradicional bloque en cono (figura 20.1). El piloncillo granulado, por su parte, es generado a partir de incorporaciones tecnológicas para obtener piloncillo en polvo; este último se registra como un sistema alternativo para las familias

rurales de la región. Los productores siguen una estrategia de agricultura familiar diversificada, en la que la producción y siembra de la caña de azúcar es solo una de las actividades relacionadas con el sector agropecuario a las que tienen que recurrir para complementar su ingreso familiar (Cuevas Reyes et al., 2017).

El uso gastronómico del piloncillo es amplio, pues se utiliza como endulzante de bebidas y para salsas, conservas, repostería, mermeladas y platos regionales. Sin embargo, en México no existe una norma oficial que defina la calidad del piloncillo, por lo que se dificulta el posicionamiento de un mercado que ayude a desarrollar el producto, lo que genera conflictos en cuanto a la calidad entre los estados productores; de esta forma, cada trapiche elabora su producto de acuerdo con la tradición familiar y las particularidades de la demanda local (Camarena-Gómez, 2014).

El desarrollo de nuevas presentaciones es una de las estrategias para promover la sostenibilidad de la agroindustria de la panela. El producto granulado tiene ventajas en comparación con la presentación en bloques, ya que es homogéneo, más fácil de medir, más estable durante el almacenamiento y más soluble (Rodríguez-Campos, 2017).

En general, el piloncillo granulado se compone casi exclusivamente de azúcares (principalmente sacarosa), más una mínima cantidad de otros componentes (agua, cenizas, proteínas y sólidos insolubles) y la presencia de un importante grupo de minerales (K, Ca, P, Mg, Na, Fe, Mn, Zn y Cu) (Gobierno del Estado de Veracruz, 2021). Por otro lado, dada la alta variabilidad encontrada principalmente en las panelas granuladas artesanales, se recomienda la generación y adaptación de tecnología básica que conduzca a la estandarización del proceso, considerando los requisitos mínimos de calidad (Guerra & Mujica, 2010).

Acciones prospectivas para la sostenibilidad

El piloncillo mexicano, en la mayoría de los casos, no presenta condiciones idóneas para su sostenibilidad. Los actores de la cadena enfatizaron en tres aspectos que podrían ayudar en esta tarea:

a. Incorporar el manejo agroecológico u orgánico de la caña de azúcar con insumos locales o regionales, buenas prácticas agrícolas, cosecha en verde y conocimiento técnico de universidades y centros de investigación.

b. Establecer, según el nivel tecnológico y las buenas prácticas de manufactura, diversas presentaciones, formas y calidades de piloncillo, de acuerdo con la cultura e idiosincrasia regional, sin perder su carácter artesanal, tradicional y regional; asimismo, diversificar los productos del trapiche, como miel o jarabe de caña, aguardiente, ron, compostas con cachazas y el bagazo excedente, entre otros.

c. Diseñar estrategias con los actores en busca de que el trapiche se establezca como bien cultural, mediante el agroturismo, la creación de museos, la generación de rutas de la caña y el piloncillo, entre otras.

Sin embargo, al respecto de la baja sostenibilidad, se establece que la falta de una Norma Oficial Mexicana integral para la cadena de valor del piloncillo les ha impedido a los productores ser beneficiarios de una serie de programas y acciones institucionales, como el mejoramiento de la producción agroecológica u orgánica de la caña de azúcar, el financiamiento, la adopción de nuevas tecnologías, la adquisición de maquinaria moderna, la certificación y la búsqueda de mercados relacionados con diversas industrias fabricantes de alimentos y bebidas artesanales alcohólicas.

El piloncillo es un producto arraigado en la cultura, en la forma de vida, y constituye el principal ingreso económico de muchas unidades familiares y comunidades indígenas con altos índices de marginación y pobreza (Moctezuma, 2006). Baca del Moral et

al. (2010) concluyeron que es imprescindible que los piloncilleros desarrollen capacidades productivas y competitivas por medio de la capacitación, la transferencia tecnológica, la adopción y adaptación de sistemas de acopio y comercialización y el financiamiento, pero también a través de esquemas organizativos y de cooperación tendientes a fortalecer su capital social, mediante la acción colectiva.

El principal desafío en el análisis de la cadena de valor del piloncillo es identificar y proponer alternativas para lograr un crecimiento sostenible en los aspectos económicos, ambientales y sociales de todos los actores involucrados, especialmente en las áreas más vulnerables y aisladas, como es el caso de muchos pequeños productores de piloncillo en México.

Conclusiones

La cadena productiva del piloncillo en México no cuenta con una certeza jurídica para regular la calidad en su producción y comercialización, así como tampoco ha incorporado innovaciones tecnológicas para incrementar y diversificar la producción en el trapiche. Por lo anterior, se requieren investigaciones multidisciplinares para analizar el impacto de los recursos tecnológicos, las capacidades y las dinámicas del territorio, con el fin de determinar cómo se pueden generar estrategias locales para la supervivencia y el sostenimiento de la producción piloncillera en el desarrollo de las economías locales y campesinas en donde esta producción se da, ya que con ello se propiciarían el desarrollo de los municipios y la sostenibilidad.

Referencias

Aguilar-Rivera, N., & Olvera-Vargas, L. A. (2021). Innovations for sustainable production of traditional and artisan unrefined non-centrifugal cane sugar in Mexico. En W. Leal Filho, E. V. Krasnov, & D. V. Gaeva (Eds.), *Innovations and traditions for sustainable development* (pp. 313-330). Springer.

Arias Ramírez, J., & Valenciano Salazar, J. A. (2017). La cadena de valor de la panela y el fortalecimiento de la agricultura familiar en Costa Rica. *ABRA*, *37*(55), 1-13. http://revistas.una.ac.cr/index.php/abra/article/viewFile/9776/11768

Baca del Moral, J. (1995). La producción piloncillera en la Huasteca potosina. *Revista de Geografía Agrícola*, *21*, 89-96.

Baca del Moral, J., Pacheco Aparicio, A., Quintero Peralta, M. A., Piza Pano, J. L., & Fabien, C. (2010). El sistema agroindustrial localizado de piloncillo en la Huasteca potosina. *Textual*, (56), 137-156. https://biblat.unam.mx/es/revista/textual-chapingo/articulo/el-sistema-agroindustrial-localizado-de-piloncillo-en-la-huasteca-potosina

Cabrera Martínez, H., & Aguilar Rivera, N. (2019). Competitividad de la agroindustria del piloncillo en la zona central de Veracruz. *Textual*, (73), 297-330. https://doi.org/10.5154/r.textual.2018.73.09

Camarena-Gómez, D. M. (2014). Los alimentos tradicionales como alternativa de turismo rural: el caso de Ures, Sonora. *Agro Productividad*, *7*(4). https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/537

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca). (2021, 11 de febrero). 8.º Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. Zafras 2011-2012 / 2020-2021. https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es

Cuevas Reyes, V., Baca del Moral, J., Borja Bravo, M., Grass Ramírez, J. F., & Rivera Martínez, G. (2017). Agricultura familiar y tecnología para la elaboración de piloncillo granulado en la comunidad de Aldzulup Poytzén, San Luis Potosí. *Nova Scientia*, *9*(19). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052017000200481

De la Cruz, L., & Garduño, J. (2021). Bebidas azucaradas: la batalla contra el sobrepeso y la obesidad en México. *Revista Digital Universitaria*, *22*(3). https://www.revista.unam.mx/wp-content/uploads/v22_n3_a6.pdf

Ferrer Cruz, J. E., Moras Sánchez, C. G., Fernández Cueto, M. J., & Álvarez Palafox, C. (2013). Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. *Revista de la Ingeniería Industrial*, *7*(1), 13-20. https://docplayer.

es/29065994-Aplicacion-de-simulacion-para-el-incremento-de-
-la-productividad-de-una-empresa-generadora-de-panela-en-la-ciuda-
d-de-tuxtepec-oaxaca.html

Figueroa-Rodríguez, K. A., Figueroa-Sandoval, B., Hernández-Rosas, F., & Morales-Morales, L. A. (2016). ¿Para quién producir caña de azúcar? Diferencias a nivel municipal en México. *Agro Productividad*, *9*(11), 83-89. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/850

Flórez-Martínez, D. H., Contreras-Pedraza, C. A., & Rodríguez, J. (2021). A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends. *Trends in Food Science & Technology*, *107*, 415-428. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.011

Galicia-Romero, M., Hernández-Cázares, A. S., Debernardi de la Vequia, H., Velasco-Velasco, J., & Hidalgo-Contreras, J. V. (2017). Evaluación de la calidad e inocuidad de la panela de Veracruz, México. *Agro Productividad*, *10*(11). https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/68

Gobierno del Estado de Veracruz. (2021). *Monografía del piloncillo*. https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiaca/Consulta/verDoc.aspx?num=411

Gómez-Narváez, F., Mesías, M., Delgado-Andrade, C., Contreras-Calderón, J., Ubillús, F., Cruz, G., & Morales, F. J. (2019). Occurrence of acrylamide and other heat-induced compounds in panela: Relationship with physicochemical and antioxidant parameters. *Food Chemistry*, *301*, artículo 125256. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125256

Guerra, M. J., & Mujica, M. V. (2010). Physical and chemical properties of granulated cane sugar "panelas". *Food Science and Technology*, *30*(1), 250-257. https://doi.org/10.1590/S0101-20612010005000012

Koutsos, T. M., Menexes, G. C., & Dordas, C. A. (2019). An efficient framework for conducting systematic literature reviews in agricultural sciences. *Science of The Total Environment*, *682*, 106-117. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.354

Lárraga Altamirano, H. R., Espinosa Guerra, O., Piedad Rubio, A. M., & Hernández Hernández, P. (2017). Modelo de segmentación de imágenes para sistema de evaluación de color del piloncillo. *Tectzapic*, (2). https://ideas.repec.org/a/erv/tectza/y2017i214.html

Moctezuma, P. (2006). Los teenek productores de piloncillo de San José Peketzén, Tancanhuitz: la construcción de una identidad étnica en la Huasteca potosina. *Relaciones: Estudios de Historia y Sociedad*, *27*(106), 153-182. https://www.redalyc.org/pdf/137/13710606.pdf

Nieto Rivera, E., & Cruz Carrasco, C. (2016). Cultura organizacional en las unidades de producción rural de piloncillo en la región de Huatusco. *Journal of Agriculture and Animal Sciences*, *5*(2). https://doi.org/10.22507/jals.v5n2a4

Noy, C. (2008). Sampling knowledge: The hermeneutics of snowball sampling in qualitative research. *International Journal of Social Research Methodology*, *11*(4), 327-344. https://doi.org/10.1080/13645570701401305

Rodríguez-Campos, J. (2017). Innovaciones en el trapiche panelero: la producción de panela granulada. *Agro Productividad*, *10*(11). https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/67

Secretaría de Gobernación (Segob). (s. f.). Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (s. f.). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2009). *Padrón de Productores de Caña de Azúcar (Zafra 2006-2007)*. Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación (Sagarpa).

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, 19 de julio). Piloncillo: endulzante artesanal que conquista el paladar. https://www.gob.mx/siap/articulos/piloncillo-endulzante-artesanal-que-conquista-el-paladar?idiom=es

Servín Juárez, R., Cruz Carrasco, C., Hidalgo Contreras, J. V., Ramírez Calderón, G., & Ramos Soto, A. L. (2018). Factores críticos en la administración de trapiches de la región de Huatusco, Veracruz. *Revista Mexicana de Agronegocios*, *42*, 919-928. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14156175011

Solís Pacheco, J. R., Pérez Martínez, F., Orozco Ávila, I., Flores Montaño, J. L., Ramírez Romo, E., Hernández Rosales, A., & Aguilar Uscanga, B. (2006). Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de caña de azúcar. *e-Gnosis*, (4) https://www.redalyc.org/pdf/730/73000401.pdf

Zidan, D., & Azlan, A. (2022). Non-centrifugal sugar (NCS) and health: A review on functional components and health benefits. *Applied Sciences*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/app12010460



Capítulo 21

La panela en El Salvador, hacia un emergente sistema sectorial de innovación y producción: estudio de caso Acopanela

Andrew Roberts Cummings y Elías Humberto Peraza Castaneda

Resumen

Esta investigación verifica si los empresarios artesanales de panela en El Salvador están emergiendo como un sistema sectorial de innovación y producción (SIS), lo que demostraría una enorme resiliencia ante el proceso de destrucción creativa desatado por la competencia del azúcar industrializada. La metodología aplicada es cualitativa, y los resultados mostraron que 1) en la agroindustria panelera están presentes, en estado incipiente, los diversos componentes que constituyen un SIS, y que 2) Acopanela ha establecido, como ventaja competitiva, la innovación basada en la construcción de capacidades de *networking*, con la asimilación dinámica de tecnología desde AGROSAVIA (sede Cimpa) como acción destacada. Así, se constata que, en el Sur Global, a menudo, el activo más importante no es el conocimiento en sí, dada su ubicación en la neoperiferia de la economía global del aprendizaje, sino el establecimiento de redes con actores robustos que poseen conocimientos innovadores en centros de excelencia de las cadenas globales de valor, como AGROSAVIA (sede Cimpa).

Palabras clave: innovación, Cimpa, sistema productivo

Introducción

Ante los desarrollos de la economía global del aprendizaje (Lundvall, 2016), es pertinente, desde el Sur Global, indagar si algunas de sus industrias están alcanzando niveles de madurez que permitan aplicarles los enfoques de dicha disciplina, en este caso, el enfoque de sistema sectorial de innovación y producción (SIS) de Malerba (2002), ya utilizado ampliamente para países en vías de desarrollo (Malerba & Mani, 2009). Esta noción sectorial de los sistemas de innovación es versátil, pues sus fronteras y su nivel de agregación se ajustan a la realidad económica y tecnológica cambiante que se aborde (Peraza Castaneda, 2019); sin embargo, debe incluir adecuadamente todos los componentes básicos de dicho sistema (Malerba, 2004): las instituciones, los actores y sus redes, y las bases de conocimiento, con énfasis en estas últimas, pues constituyen el aspecto diferencial de dicha noción. En el caso de la panela, se considera de especial relevancia la combinación de bases de los saberes tácitos generados durante las experiencias de diversas generaciones de familias paneleras y las del propio proceso de emergencia y evolución de la Asociación Cooperativa de Paneleros de El Salvador (Acopanela), con las bases científicas y experimentales del conocimiento innovador que ha sido asimilado en este sistema agroalimentario localizado en el Valle de Jiboa, en El Salvador; este conocimiento proviene principalmente del Cimpa, denominado originalmente de esta manera por las siglas del Convenio de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (ICA-Holanda). Actualmente el Cimpa, sede de AGROSAVIA, es un centro colombiano de excelencia de conocimientos innovadores sobre la producción panelera en América Latina.

Las instituciones bajo este enfoque consisten en las rutinas, los hábitos comunes, las prácticas establecidas y las reglas, leyes o normas que orientan el comportamiento de los actores que participan en los procesos innovadores (Edquist, 1997; Nelson & Sampat, 2001).

Con respecto a los actores, pueden identificarse agentes heterogéneos que interactúan mediante procesos de comunicación, intercambio, cooperación o competencia. La naturaleza de dichos agentes puede ser tanto de mercado (otras empresas de la cadena de valor, proveedores, clientes e incluso competidores) como de no mercado (universidades, organizaciones financieras, agencias gubernamentales, autoridades locales, etc.), pero tienen en común que apoyan la innovación, la difusión tecnológica y la producción de las empresas del sector de diversas maneras. Dentro de los sistemas sectoriales, dichos agentes están a su vez conectados a través de las relaciones de mercado y de no mercado. De ahí que las redes permiten el acceso y la integración de los aspectos complementarios en el conocimiento, las capacidades y la especialización (Edquist, 1997; Lundvall, 1992; Teubal et al., 1991).

El tercer componente esencial de un SIS es su base de conocimiento, cuya naturaleza puede ser analítica, sintética o simbólica (Asheim, 2009). Una base de conocimiento analítico se refiere a entornos industriales en los que el conocimiento científico es muy importante, mientras que una base de carácter sintético concierne a entornos industriales en los que la innovación se lleva a cabo principalmente a través de la aplicación de los conocimientos tácitos existentes o mediante nuevas combinaciones de estos. Una última posibilidad es una base de conocimiento simbólica, en la que el conocimiento asociado se relaciona con las cualidades estéticas de los productos, la creación de diseños e imágenes y el uso económico de las diversas formas de artefactos culturales. Las bases de conocimiento, a su vez, están relacionadas con el modo de aprendizaje dominante en el sector, a saber: aprendizaje DUI (*doing, using, interacting*), basado en la experiencia y el conocimiento sintético (también le corresponde el simbólico), o aprendizaje STI (*science, technology and innovation*), basado en procesos de generación de conocimiento analítico (Jensen et al., 2007). Por su parte, Asheim et al. (2007) plantean que tanto los conocimientos generados como los utilizados por las empresas a la hora de innovar muestran rasgos comunes entre aquellas que pertenecen a un mismo sector. Esta realidad tiene su explicación en las necesidades heterogéneas de conocimiento de los distintos sectores productivos (figura 21.1).

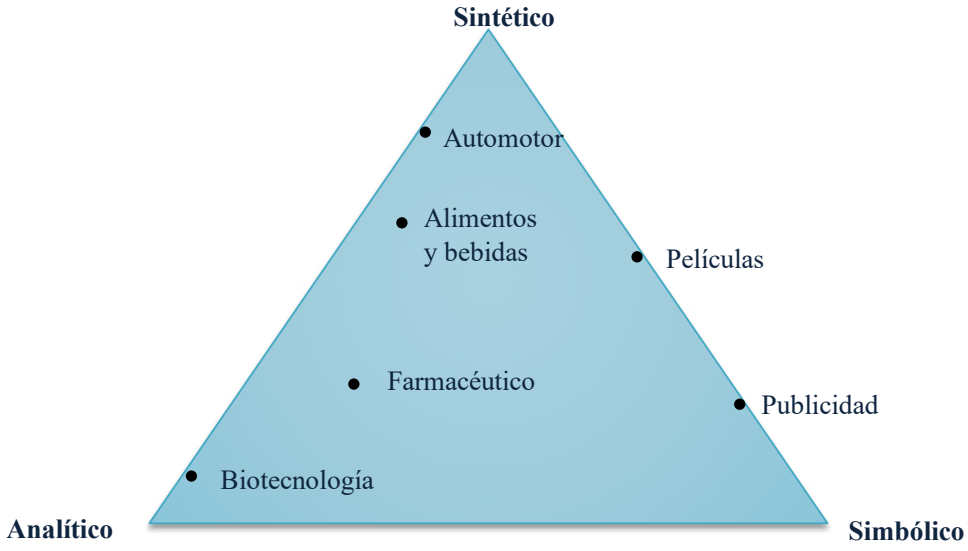


Figura 21.1. Bases de conocimiento y sectores industriales.

Fuente: Peraza Castaneda (2019), con base en Asheim et al. (2007)

Un matiz aún más disruptivo para analizar la estructura de una industria desde el enfoque de los sistemas de innovación consiste en entender el SIS (Malerba, 2002) como la unión, desde la perspectiva de la teoría de conjuntos (Lipschutz, 1991), de varios sistemas de innovación tecnológica (SIT) (Markard & Truffer, 2008); esta propuesta fue aplicada por Andersen (2015) al caso de la industria de la caña de azúcar en Brasil, desde su cultivo hasta la producción de biocombustible.

En el presente estudio, con una metodología cualitativa, desde una perspectiva evolucionista, se verificó si la pequeña agroindustria rural panelera salvadoreña ha trascendido a un emergente SIS en el Sur Global; para esto, se determinó si cada uno de los elementos de dicho enfoque está presente, al menos en estado incipiente, en una empresa de economía social clave en el sector de la panela salvadoreña: Acopanela. Al respecto, se analizó la importancia de la construcción de capacidades de *networking*, vinculación y relacionamiento para la innovación como ventaja competitiva sostenible para esta empresa.

Metodología

Para la realización de este estudio, se comenzó por una revisión de la literatura relevante, para contextualizar el caso de Acopanela, vista como el embrión de un SIS, en el marco de la evolución histórica del cultivo de la caña de azúcar para la generación de diferentes tipos de azúcares con diferentes tecnologías de producción, y, de forma más general, el caso de la panela en El Salvador. Esta revisión fue realizada en bases de datos internacionales, teniendo en cuenta tanto revistas (Scopus, Web of Knowledge, Google Académico y Dialnet) como estadísticas agroindustriales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y Banco Mundial), y nacionales (organizaciones de educación superior salvadoreñas). Para procesar las fuentes secundarias, se aplicó un proceso analítico-sintético, que consiste en desmembrar un todo en sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos, y después relacionar cada reacción mediante la elaboración de una síntesis general del fenómeno estudiado. Así fue como se establecieron el estado del arte y los resultados de la investigación sobre la evolución histórica y la corroboración técnica de la existencia de un SIS de la panela.

Es en este contexto en el que se presenta el estudio de caso de Acopanela. Los resultados se sustentan en entrevistas semiestructuradas realizadas al equipo directivo de la referida empresa de economía social entre octubre de 2021 y febrero de 2022, así como en otras previas realizadas por uno de los autores (Cummings & Cogo, 2016).

Como estudio de caso, Cummings y Cogo (2016) argumentan que,

> en el contexto regional centroamericano y nacional, Acopanela es un "caso crítico", ya que tiene una "importancia estratégica en relación con el problema general" de cómo fortalecer las capacidades productivas y la competitividad de pequeñas agroindustrias rurales, como la de la panela (Flyvbjerg, 2004, p. 426).

> La cooperativa Acopanela ofrece lecciones potencialmente relevantes para el fortalecimiento innovador de industrias similares, con bases de conocimientos tradicionales significativos, que enfrentan desafíos complejos que requieren acceder a fuentes exógenas de conocimientos innovadores y recursos para superarlos. [Traducción propia]

El estudio de caso aquí presentado se construye con base en descripciones y análisis previos realizados por Cummings (2003, 2013) y Cummings y Cogo (2016) sobre la experiencia de Acopanela en coevolución con las particulares dinámicas de su contexto sectorial y territorial. La información base para el desarrollo del estudio de caso proviene principalmente de entrevistas a profundidad con personas consideradas como informantes clave debido a sus conocimientos específicos, adquiridos al estar involucradas en la toma de decisiones políticas y técnicas en Acopanela, por ser conocedoras de sus operaciones o por asumir funciones de apoyo en sus procesos de innovación. Así pues, con respecto a la emergencia, evolución y relevancia de las capacidades de innovación, vinculación y relacionamiento con actores exógenos (*networking*), las preguntas fueron abordadas en entrevistas a profundidad a un socio fundador, primer y actual presidente de Acopanela (marzo de 2011), y un representante de la oficina en El Salvador del Fondo Multilateral de Inversiones, del Banco Interamericano de Desarrollo (BID-Fomin), quien apoyó el desarrollo de la iniciativa desde su posicionamiento institucional (abril de 2011). Estas entrevistas, que fueron fundamentales para la elaboración del caso publicado por Cummings y Cogo (2016), fueron complementadas por entrevistas adicionales al actual presidente de Acopanela, a la actual gerente y al exgerente y asesor de la cooperativa (febrero de 2022), que fueron realizadas con el propósito de actualizar los conocimientos sobre el estado actual de desarrollo de la cooperativa y profundizar en la relación entre Acopanela y el Cimpa (sede de AGROSAVIA), como el centro de excelencia del sistema sectorial de innovación y producción de panela en América Latina.

Las evidencias de este conjunto de entrevistas fueron complementadas por una diversidad de fuentes bibliográficas, de textos publicados e inéditos, incluyendo artículos periodísticos sobre actividades de relevancia en la evolución de la cooperativa, como los de la Ruta de la Panela, además de un reporte de evaluación de los proyectos del BID-Fomin en apoyo a Acopanela (no publicado) y otro de resultados de una visita importante que realizaron personas de liderazgo político y técnico de Acopanela a una feria comercial internacional realizada en Taiwán.

El caso, sin embargo, debe ser considerado todavía como exploratorio, dada la complejidad del objeto de estudio: la emergencia, evolución y alcance de las capacidades de innovación de Acopanela frente a sus retos para fortalecerse todavía más en función del logro de su objetivo de lograr el bienestar de sus asociados.

Resultados y discusión

Esta sección se organiza en tres apartados para exponer de mejor manera los hallazgos encontrados sobre el SIS de la panela en El Salvador: su trayectoria tecnológica; el estado del SIS por cada uno de sus componentes, según Malerba (2004), y la importancia de la construcción de capacidades de *networking* para la innovación, ejemplificada con el estudio de caso de Acopanela.

Evolución del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar en El Salvador

En cuanto a los orígenes del cultivo de caña de azúcar en El Salvador, se considera que uno de los 63 fundadores de San Salvador, Sancho de Figueroa, fue el primero en sembrar caña de azúcar en una de sus propiedades, cercana a Cojutepeque, en 1532, y posteriormente se difundiría el cultivo en los territorios de las entonces provincias de San Salvador y San Miguel, así como en la Alcaldía Mayor de Sonsonate. Respecto a las primeras estadísticas oficiales de producción azucarera en trapiche, así como

de elaboración de otros derivados, estas datan de mediados del siglo XIX. La Estadística General (1858-1861) refleja la existencia de cultivos cañeros y la producción de panelas y azúcar en las zonas central y occidental del país, aunque el volumen de estas actividades era casi insignificante respecto a la producción de café (Cañas-Dinarte et al., 2009), pues este último se estaba consagrando ya como primer producto de exportación en detrimento del añil (Alvarenga et al., 1994).

El proceso productivo en dicha época era de corte artesanal, y la panela, o "dulce de atado", se elaboraba en trapiches que se concentrarían en la zona del Valle de Jiboa. Una hacienda que pasaría a ser emblemática en el sector, denominada El Ángel, bajo el liderazgo de su propietario, Rafael Meléndez Quirós, en 1862, se reestructuraba para dedicarse totalmente al cultivo intensivo de caña de azúcar; su éxito fue tal que le permitió, pocos años más tarde, equiparse con un trapiche de tracción animal para la fabricación de panelas de azúcar de pilón, que, transportadas por mulas, eran vendidas en los mercados municipales de San Salvador, con lo que se convirtió en la primera empresa azucarera integral de la época (Cañas-Dinarte et al., 2009). Un hito histórico en cuanto a la tecnología del sector se daría en 1882, cuando la Hacienda Azucarera El Ángel importó por primera vez, desde Inglaterra, un moderno molino para fabricar azúcar; así, El Ángel se establecía como el primer ingenio salvadoreño y como el primero en producir azúcar blanca. Al respecto, es importante destacar la coexistencia de ambas tecnologías, azúcar centrifugada y no centrifugada, y la primera se establecería luego como modelo dominante.

Ya para la década de 1920, algunos empresarios extranjeros y nacionales decidieron invertir recursos en la compra y desarrollo de otros ingenios, como fue el caso de San Andrés, El Carmen y El Castaño; a estas empresas se irían sumando, en las primeras décadas del siglo XX, otras instalaciones, como las de los ingenios Los Lagartos, Prusia, Santa Emilia, La Labor, San Francisco, entre otros (Cañas-Dinarte et al., 2009). De esa

manera, quedaba configurado el panorama azucarero salvadoreño para esa época, que se debatía entre facetas artesanales e industriales. A estos últimos se sumaron, durante la segunda mitad del siglo XX, otros ingenios que se mantienen hasta la fecha: Central Izalco (1964), Ingenio Chaparrastique (1982), Ingenio La Cabaña (hacia 1959), Ingenio Azucarero Jiboa (1976) e Ingenio La Magdalena (1965). Así, para 2009, ese sector agroindustrial de azúcar centrifugada estaba conformado por 7.000 productores de caña y seis ingenios, que generaban en conjunto unos 50.000 empleos directos y 200.000 indirectos, especialmente en el área rural (Cañas-Dinarte et al., 2009).

Ahora bien, en lo que respecta al azúcar no centrifugada (panela), es pertinente indicar que este producto tiene una considerable demanda global; en 2020, el líder en su producción era India, con 7.583.000 toneladas, seguido por Colombia, con 1.002.000 toneladas; Pakistán, con 708.000 toneladas; China, con 530.000 toneladas, y Brasil, con 389.000 toneladas (Sánchez, 2021). Para el caso salvadoreño, desglosar la producción panelera de las pequeñas empresas familiares de trapiches o moliendas y la de los ingenios de azúcar centrifugada, que tienen líneas diversificadas tangenciales a esta, es un reto por la contabilización económica de la panela por parte del Código Aduanero Uniforme Centroamericano (Cauca), que no distingue entre estos dos tipos de producción. Lo que sí es pertinente señalar en función de los datos globales de producción es que el establecimiento de redes con organizaciones de mercado y no mercado de Colombia, como AGROSAVIA (sede Cimpa), llega a ser prioritario para incrementar la competitividad basada en la diferenciación, esto es, para garantizar la sostenibilidad por vía de la innovación en las entidades salvadoreñas de economía social.

La panela en El Salvador: embrión de un SIS

Para verificar si la agroindustria panelera en El Salvador cumple con los requisitos para ser considerada un SIS, aun en estado incipiente, se aborda el estado de cada uno de sus componentes según

el planteamiento de Malerba (2004). En lo que respecta a las principales instituciones duras (legislación) que afectan al sector de la industria panelera en El Salvador y sus procesos innovadores, es pertinente adoptar el marco propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1997), que las distingue entre económicas, sociales y administrativas, y que ya ha sido contrastado para dicho país, en otro nivel de agregación, en el rubro de alimentos, bebidas y tabaco (Peraza Castaneda, 2019). Con respecto a las instituciones económicas, se tienen dos grandes grupos: el primero es el relativo a la regulación de competencia, en el que, además de la regulación general de toda la economía, están presentes dos instrumentos específicos: 1) el Reglamento de Sistema de Pago de Caña de Azúcar y 2) el Reglamento de Distribución de Asignaciones Anuales de Azúcar para los Mercados Internos, Preferencial y Mundial. En cuanto a este último, directivos de Acopanela manifiestan que se podría hacer más para favorecer su pequeña agroindustria en materia de cuotas de exportación frente a los grandes ingenios (comunicación personal, febrero, 2022). El otro grupo es el relativo a la promoción de la innovación y la competitividad, en el que se destaca el instrumento legal específico de Ley de la Producción, Industrialización y Comercialización de la Agroindustria Azucarera de El Salvador, que data de 2001.

Por su parte, en la regulación social, integradora de las aristas de medio ambiente, inocuidad y salud, protección al consumidor-calidad, trabajo y transparencia, se destaca, como instrumento legal específico para el azúcar centrifugada (art. 2), la Ley de Fortificación del Azúcar con Vitamina "A", que data de 1994.

Finalmente, las regulaciones de carácter administrativo se subdividen en tributarias y de propiedad intelectual, en las que no se encuentra ninguna específica para el sector, aunque el marco existente se puede explotar aún con Indicaciones Geográficas (Ruiz López & Colin Salgado, 2010).

En cuanto a los actores y sus redes, al adaptar a la industria salvadoreña de la panela el enfoque de sistema sectorial de innovación y producción de Essegbey y Ofori-Gyamfi (2012), para países en vías de desarrollo, se obtiene el mapa de la figura 21.2.

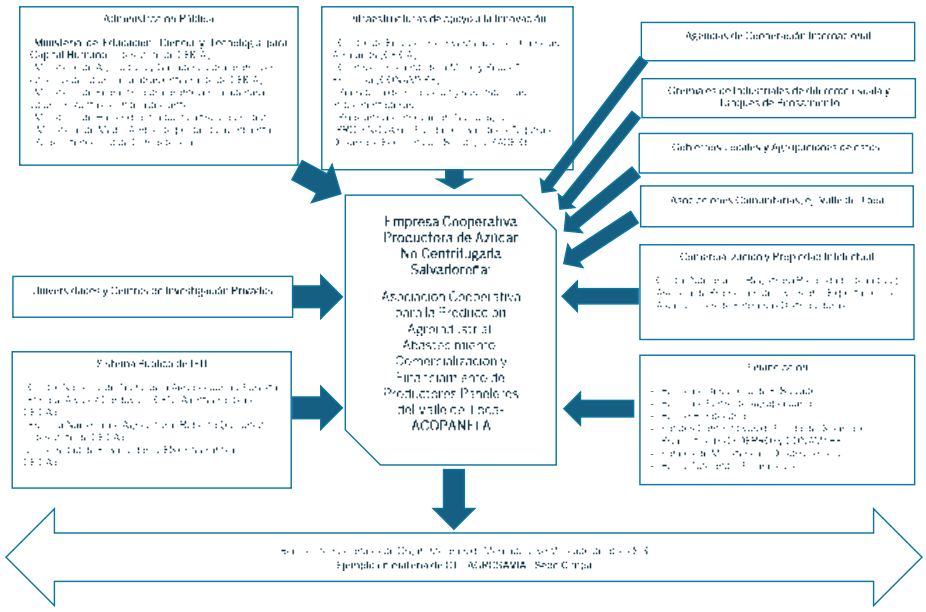


Figura 21.2. Actores del sistema sectorial de innovación y producción de la agroindustria del azúcar no centrifugada en El Salvador.

Fuente: Elaboración propia con base en Essegbey y Ofori-Gyamfi (2012)

Respecto al componente de base de conocimiento para la industria agroalimentaria salvadoreña, de la cual forma parte el azúcar no centrifugada (panela), están presentes las tres tipologías de conocimiento, con preponderancia del sintético (Asheim et al., 2007). Peraza Castaneda (2019) verificó esa base a través de aproximaciones, mediante índices de ciencia y tecnología, y concluyó que su modo de aprendizaje es especialmente DUI.

Por tanto, un reto latente para la agroindustria agroalimentaria en El Salvador, y específicamente para la panelera, es incorporar más conocimiento de naturaleza simbólica y analítica bajo una lógica de SIS, pero también tener en cuenta las dinámicas territoriales de lo que se podría comprender como un sistema territorial

de innovación, por ejemplo, en el Valle de Jiboa (Cummings, 2016). Se puede argumentar que la combinación de las dos dinámicas (DUI y STI) genera resultados positivos y que es su presencia simultánea, de forma complementaria y sinérgica, la que incrementa la introducción al mercado de las innovaciones de producto en el sector panelero en El Salvador, en general, y específicamente en el caso emblemático analizado (Asheim, 2009). Ante ello, Szogs et al. (2011) sostienen que para los países en vías de desarrollo es prioritario fortalecer redes de cooperación, tanto nacionales como internacionales, en materia de construcción de capacidades de *networking* para la innovación. Como será revelado más adelante, la capacidad de *networking* demuestra ser un elemento clave explicativo del desempeño innovador en la realidad de Acopanela, así como de sus limitaciones; igualmente, es un aspecto integral y constitutivo de la capacidad dinámica de más alto nivel de innovación de la cooperativa.

Al aplicar el planteamiento de Andersen (2015) en el caso de la caña de azúcar en El Salvador, se identifican tres sistemas de innovación tecnológica (SIT) con diferentes grados de desarrollo dentro del incipiente SIS abordado (figura 21.3): 1) generación de semilla de caña de azúcar y control de plagas, 2) operaciones agrícolas y 3) procesamiento de la caña de azúcar; en este último coexisten dos tecnologías: la de azúcar centrifugada y la de azúcar no centrifugada (panela).

Acopanela: capacidades de *networking* para innovar como ventaja competitiva sostenible

Acopanela inició sus operaciones en 2004 con 17 socios productores, y su propósito inicial era comercializar el producto panelero a un precio justo, para garantizar una mejor calidad de vida a los productores y, consecuentemente, evitar la desaparición de la panela como producto local tradicional (presidente de Acopanela, comunicación personal, febrero, 2022). Esto implicaba el desarrollo de un producto con características "étnicas" salvadoreñas y que pudiera cumplir con los estándares de calidad de exportación.

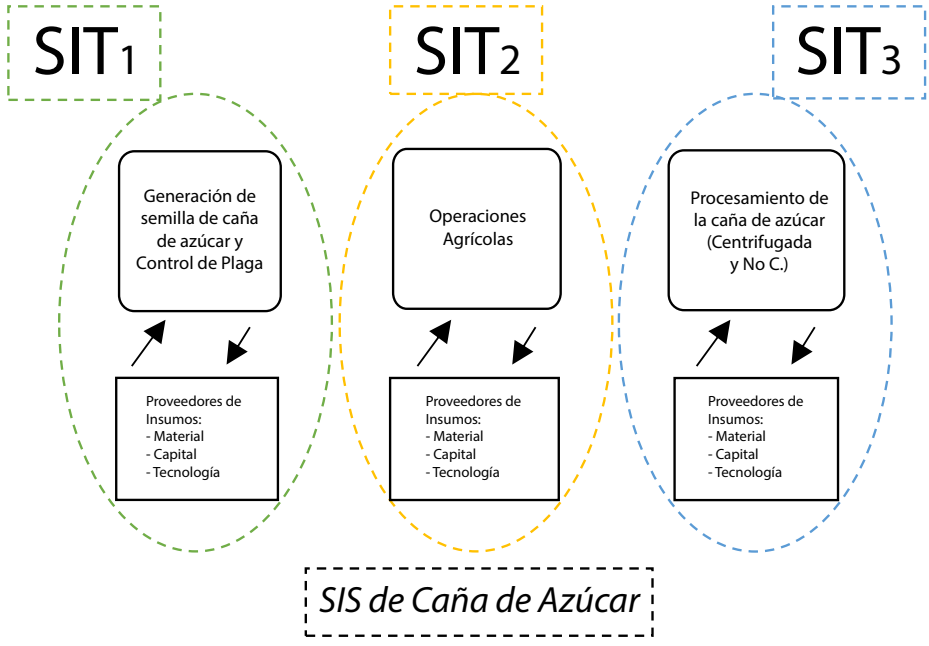


Figura 21.3. Bosquejo del sistema sectorial de innovación y producción de la caña de azúcar en El Salvador como unión de varios sistemas de innovación tecnológicos.

Fuente: Elaboración propia con base en Andersen (2015)

El problema radicaba en que, si bien estaban motivados para innovar, solo tenían un conocimiento limitado del mercado y de las oportunidades tecnológicas que estaban surgiendo en paralelo en otras partes del mundo, incluyendo Colombia, como centro de excelencia para América Latina (Cummings & Cogo, 2016). Desde la perspectiva de la economía evolucionista, se estaba ante un esfuerzo por organizar las unidades de producción artesanal familiar —trapiches— en empresas de economía social, con el fin de rescatar la base culturalmente arraigada para sus medios de vida familiares, el empleo local desde el fortalecimiento de las capacidades de resiliencia y la respuesta proactiva de su pequeña agroindustria frente a la "destrucción creativa" (Schumpeter, 1943), que comenzó en 1976 con la puesta en marcha de la planta industrial de procesamiento de azúcar centrifugada del Ingenio

Azucarero Jiboa. Desde esta misma perspectiva, la emergencia y evolución de Acopanela implicó una innovación en las instituciones, rutinas, hábitos comunes y prácticas establecidas que regulaban las relaciones entre los actores de las empresas familiares, bajo la lógica y las reglas, leyes y normas que debían aplicar al ser socios de la cooperativa, participar en su gobernanza y tomar decisiones sobre su grado de involucramiento como proveedores de las operaciones productivas y comerciales propias de la cooperativa. Todo esto orientó el comportamiento de los actores que participaban en los procesos innovadores (Edquist, 1997; Nelson & Sampat, 2001).

Una vez organizados, los pequeños agroindustriales de Acopanela introdujeron mejores prácticas de manufactura y construyeron el primer "trapiche modelo", con capacidad para atender las demandas de mercados dinámicos, nacionales e internacionales, ofreciendo un producto tradicional, "étnico", higiénico, de alta calidad y uniforme. Así, emergían las primeras expresiones de las capacidades de innovación que Acopanela iba construyendo, las cuales se fortalecerían a través de un largo proceso que comenzaba con el descubrimiento de la panela granulada como una alternativa innovadora, de importantes ventajas y complementaria a la comercialización de la tradicional presentación sólida "dulce de atado", incluyendo una demanda dinámica en el mercado internacional de azúcares naturales. Sin embargo, en este camino tuvieron que enfrentar retos relacionados con las inversiones necesarias para la modernización de las moliendas tradicionales para producir la calidad y cantidad requerida de panela sólida y granulada para exportación, pues no eran factibles para la mayoría de las familias cooperativistas. Así, el potencial proceso innovador parecía llegar a un callejón sin salida (Cummings & Cogo, 2016).

La solución para lograr implementar el proceso innovador deseado vendría a través del fortalecimiento de sus capacidades de *networking* y aprendizaje interactivo. Así como argumentan Van Geenhuizen y Nijkamp (1999), la práctica de trabajo en red, o *networking*, se refleja en la participación intencional de Acopanela

en redes, la formación de nuevas redes y la disolución de las antiguas en función del logro de sus objetivos, como la producción de panela sólida con buenas prácticas de manufactura para la exportación y de panela granulada en una nueva planta procesadora con tecnología colombiana.

Arocena y Sutz (2000) argumentan que en la "neoperiferia" del sistema global, donde se encuentra El Salvador, los elementos de un "sistema" de innovación están fragmentados y débiles, y así, el sistema como tal, independientemente de su noción, existe en estado emergente. El alcance de las capacidades de los sistemas nacionales y sectoriales de innovación y producción, incluyendo la pequeña agroindustria rural, es débil (Cummings, 2007), por lo cual es necesario que existan actores que compartan conocimientos innovadores y que esto se dé entre iniciativas económicas de territorios periféricos y centros de excelencia nacionales o internacionales, lo cual es necesario para innovar, como argumentan Szogs et al. (2011). Al respecto, sobre las empresas agroindustriales de pequeña escala, como Acopanela, la economía evolucionista señala que su eficacia para innovar y obtener una ventaja competitiva dependerá en gran medida de su acumulación de capacidades de *networking* para materializar las sinergias potenciales tanto entre los miembros de la empresa como entre estos y socios externos (Porter, 1990). El caso de Acopanela es especialmente interesante, pues es la cooperativa misma la que actúa como intermediaria de los conocimientos innovadores, las capacidades y la especialización del Cimpa, un centro de excelencia colombiano para la cadena global de valor de la panela, así como argumentan Edquist (1997), Lundvall (1992) y Teubal et al. (1991) para las redes de innovación.

En este sentido, un hito clave para Acopanela fue conocer trayectorias tecnológicas (Dosi, 1988; Dosi et al., 1988) innovadoras para la producción de panela granulada en Colombia, y de ahí poner en práctica su capacidad de *networking* con productores de panela y expertos técnicos de ese país. Así, después de su viaje inicial de reconocimiento al Cimpa, en Colombia, la cooperativa pudo

movilizar recursos para una segunda visita, diseñada específicamente para aprender sobre el proceso de elaboración de panela granulada, directamente con técnicos del Cimpa, en un proceso dialógico de aprendizaje interactivo con productores colombianos de panela. El entonces y actual presidente de la cooperativa también estaba conectado con el Cimpa, que actualmente rige como sede de AGROSAVIA.

Durante esa segunda visita, se negoció la participación de técnicos de dicho centro de investigación en el primer proyecto de la cooperativa financiado por el BID-Fomin, "Producción y comercialización de panela granulada del Valle de Jiboa" (ES-M1012), para mejorar la producción tradicional de trapiche y desarrollar productos alternativos, donde nuevamente fueron claves sus capacidades de relacionamiento y vinculación, ahora con un financista. El entonces presidente de Acopanela destacó que "no buscábamos a quién traer; ya teníamos los contactos", de ahí que se llevaran "técnicos adecuados a nuestras necesidades" (presidente de Acopanela, comunicación personal, febrero, 2022). La relación de Acopanela con actores de la sede Cimpa de AGROSAVIA continuó en un segundo proyecto de asistencia técnica financiado por el BID, "Industrialización, desarrollo tecnológico y comercialización del sector panelero" (ES-M1023), orientado a construir y establecer una planta para panela granulada en funcionamiento. Luego de validar la tecnología de procesamiento por implementar, se buscó el financiamiento necesario para su implementación con las capacidades de *networking*; en esta ocasión, el proyecto se desarrolló con ayuda del Ministerio de Economía y el Banco Hipotecario, ambos de El Salvador, aparte del BID-Fomin.

Acopanela fue capaz de evitar un callejón sin salida, el de la actualización de cada molienda familiar con inversiones requeridas, pero no factibles de realizar en muchos casos, para lograr su certificación para exportación de alimentos; lo que hizo fue crear una nueva trayectoria tecnológica mediante el establecimiento de una planta semiindustrial, de tamaño mediano, que produjera panela granulada con calidad de exportación. El actual

presidente de Acopanela manifestó que inicialmente compraban mieles precocidas de la caña de azúcar evaporada en los peroles de las moliendas de cada uno de sus asociados (presidente de Acopanela, comunicación personal, febrero, 2022). Sin embargo, a través de la experimentación y el aprender haciendo, tomaron la decisión de comprarles la caña de la variedad y con el proceso agronómico indicados para la panela granulada, y procesarla para generar las mieles precocidas en las dos moliendas inicialmente conocidas como "modelo", con mayores inversiones en capacidad productiva, para la implementación de buenas prácticas de manufactura, antes de finalizar la producción de la panela granulada en la planta de tecnología colombiana. Así, el desarrollo de la panela granulada como producto innovador en Acopanela fue un esfuerzo cooperativo que ninguno de los dueños individuales de los trapiches hubiera podido hacer por sí solo. Colectivamente, tampoco habrían sido capaces de hacer esto sin sus conexiones con redes de innovación externas.

En cuanto a la producción de la presentación en "dulce de atado", que es empacado y comercializado como producto "étnico" en el mercado de los salvadoreños migrantes en Estados Unidos, siempre ocupan las moliendas de sus socios paneleros, quienes cumplen con los requisitos básicos de higiene para garantizar la calidad requerida para la exportación.

Las dinámicas innovadoras de Acopanela brindan mayor sostenibilidad económica a la producción familiar en los pequeños trapiches, que califican como proveedores, lo que les permite a las familias mantener el valor cultural de sus procesos productivos para conservar su identidad comunitaria y para proyectar su potencial como base de iniciativas de turismo rural comunitario de la Ruta de la Panela (Cummings & Cogo, 2016). Estas dinámicas también han estabilizado el precio de mercado para el conjunto más amplio de los productores paneleros, lo que ha impactado positivamente en el bienestar multidimensional de estas familias, socias o no de Acopanela (presidente de Acopanela, comunicación personal, febrero, 2022).

El estudio de caso de la empresa de economía social Acopanela demuestra cómo se pudo establecer, en el Sur Global, una ventaja competitiva sostenible al lograr una mejora innovadora de los sistemas de producción y comercialización de panela, sustentándola en una relación sinérgica entre las capacidades de aprendizaje y *networking* de esta empresa, con varios objetivos: 1) desarrollar y aprovechar la base de conocimientos endógenos para identificar y acceder a conocimientos innovadores de un centro de excelencia internacional y de otras fuentes del sistema sectorial de innovación y producción existente en su forma fragmentada para la panela en América Latina; 2) identificar y capturar tecnologías innovadoras alternativas como soluciones a los problemas de desempeño que amenazaban con la destrucción creativa de los medios de vida y la identidad sociocultural de familias productoras de panela en el Valle de Jiboa; 3) localizar y movilizar los recursos financieros necesarios para implementar el cambio tecnológico, destacando las gestiones de financiamiento con organismos nacionales e internacionales, e 4) iniciar un proceso para asimilar dinámicamente estos elementos exógenos en iniciativas innovadoras, pero sin perder (y, por el contrario, reforzando) el valor de sus conocimientos sintéticos y simbólicos de arraigo territorial, como familias empresarias paneleras.

Los retos venideros para Acopanela y, en general, para la agroindustria panelera de pequeña escala transitan por continuar fortaleciendo sus capacidades de *networking* y aprendizaje interactivo para profundizar en la asimilación dinámica de los conocimientos innovadores que evolucionan en los sistemas de innovación tecnológicos relacionados con el procesamiento, pero también con la generación de variedades de caña, así como con el resto de operaciones agrícolas de la cadena de valor global de la panela (Andersen, 2015) (figura 21.3). Así pues, se considera que la dinámica de Acopanela en El Salvador es una contribución de esta iniciativa de la economía social y solidaria a la sofisticación holística del sistema sectorial de innovación para la producción y comercialización de la panela, tanto sólida como granulada, en Centroamérica y, más ampliamente, en América Latina.

En cuanto al desafío que significó la pandemia de covid-19 para Acopanela en el ciclo productivo 2020-2021, el reto se centró en garantizar la producción, mientras que para el ciclo 2021-2022 tuvo que ver más con la comercialización, puesto que los cierres de la economía durante el primer ciclo hicieron que los clientes se quedaran con inventario; para hacerles frente a dichos desafíos, los productores usaron sus capacidades de *networking* y aprendizaje interactivo. Así, incluso proyectan adquirir, desde Colombia, otro trapiche moderno y ajustado a sus necesidades, mejorar el empaque y comenzar paulatinamente una transformación digital, en su arista de *marketing*, con la creación de una página web (presidente de Acopanela, comunicación personal, febrero, 2022).

Conclusiones

El sector de la panela tiene un arraigo histórico en El Salvador, y demuestra en el Valle de Jiboa una inmensa resiliencia ante la destrucción creativa del azúcar centrifugada en el siglo XX, gracias a que sus actores impulsores han sabido adaptarse y asimilar dinámicamente los conocimientos avanzados para enfrentar y superar múltiples retos en el camino. La evidencia discutida respalda, por un lado, la existencia de un SIS de la panela (sólida y granulada), aunque todavía en un estado emergente, fragmentado y con poco arraigo territorial; por el otro, demuestra que, para esta pequeña agroindustria salvadoreña, las capacidades para trabajar y aprender en redes (*networking*) podrían ser el recurso más importante, y la construcción de estas redes (en especial con centros de excelencia en cadenas globales de valor) se establece como el proceso más importante en su dinámica innovadora (Szogs et al., 2011) para enfrentar con éxito sus actuales y futuros retos.

Agradecimientos

Agradecemos el interés y la colaboración del equipo de liderazgo de Acopanela, quienes hicieron tiempo en su agenda para

conversar y compartir sus valiosos conocimientos sobre la evolución de la cooperativa y, en particular, sobre su relación con AGROSAVIA (sede Cimpa): Antonio Hernández, fundador y presidente; Merlín Cerros, gerente, y Mauricio Meléndez, exgerente y asesor. Reconocemos también el aporte de Eleonora Cogo como investigadora y coautora del texto académico que caracteriza analíticamente la naturaleza, dinámica y capacidades de innovación de Acopanela.

Referencias

Alvarenga, P., Amaroli, P., Cáceres, J., Eguizábal, C., Fernández, J. A., Fowller, W., Lauria, A., Lindo Fuentes, H., Melhado, O. E., Panameño, R., & Walter, K. (1994). *Historia de El Salvador*. Ministerio de Educación.

Andersen, A. D. (2015). A functions approach to innovation system building in the South: The pre-Proálcool evolution of the sugarcane and biofuel sector in Brazil. *Innovation and Development*, *5*(1), 1-21. https://doi.org/10.1080/2157930X.2014.996855

Arocena, R., & Sutz, J. (2000). Looking at national systems of innovation from the South. *Industry and Innovation*, *7*(1), 55-75. http://dx.doi.org/10.1080/713670247

Asheim, B., Coenen, L., Moodysson, J., & Vang, J. (2007). Constructing knowledge-based regional advantage: Implications for regional innovation policy. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, *7*(2-5), 140-155. http://doi.org/10.1504/IJEIM.2007.012879

Asheim, B. T. (2009). La política regional de innovación de la próxima generación: cómo combinar los enfoques del impulso por la ciencia y por el usuario en los sistemas regionales de innovación. *Ekonomiaz*, (70), 86-105. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3117920

Cañas-Dinarte, C., De Sola Jokisch, L., Imberton, M., & Escalante Arce, P. A. (2009). *Eran mares los cañales…* Kalina.

Cummings, A. R. (2003). *Innovación y la pequeña agroindustria rural en El Salvador. Estudios de caso: la producción, procesamiento y comercialización del marañón y la panela granulada orgánica*. Fundación Nacional para el Desarrollo. https://repo.funde.org/1260/

Cummings, A. R. (2007). *Against all odds: Building innovative capabilities in rural economic initiatives in El Salvador* [tesis de doctorado, Aalborg University].

Cummings, A. R. (2013). Construyendo capacidades de innovación en iniciativas asociativas de pequeñas agroindustrias rurales en El Salvador. *CTS: Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, *8*(24), 295-319. https://www.redalyc.org/pdf/924/92429917014.pdf

Cummings, A. R. (2016). La emergencia de sistemas territoriales de innovación en El Salvador y la participación de las universidades. En J. Núñez Jover, & A. Alcazar Quiñones (Coords.), *Universidad y desarrollo local: contribuciones latinoamericanas* (pp. 83-98). Unión de Universidades de América Latina y el Caribe; Ministerio de Educación Superior de Cuba; Cátedra Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación de la Universidad de La Habana.

Cummings, A. R., & Cogo, E. (2016). Networking capabilities and innovation in a traditional small-scale agro-industry: The ACOPANELA Cooperative in El Salvador. En W. Siyanbola, O. Olamade, & A. Egbetokun (Eds.), *Innovation systems and capabilities in developing regions. Concepts, issues and cases*. Routledge.

Dosi, G. (1988). Sources, procedures and microeconomics effects of innovation. *Journal of Economic Literature*, *26*(3), 1.120-1.171. https://www.jstor.org/stable/2726526

Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G., & Soete, L. (1988). *Technical change and economic theory*. Pinter.

Edquist, C. (Ed.). (1997). *Systems of innovation: Technologies, institutions and organizations*. Pinter.

Essegbey, G. O., & Ofori-Gyamfi, E. (2012). Ghana cocoa industry—An analysis from the innovation system perspective. *Technology and Investment*, *3*(4), 276-286. http://dx.doi.org/10.4236/ti.2012.34038

Jensen, M. B., Johnson, B., Lorenz, E., & Lundvall, B. Å. (2007). Forms of knowledge and modes of innovation. *Research Policy*, *36*(5), 680-693. http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.006

Lipschutz, S. (1991). *Teoría de conjuntos y temas afines*. McGraw-Hill.

Lundvall, B.-Å. (1992). *National systems of innovation: Toward a theory of innovation and interactive learning*. Pinter.

Lundvall, B.-Å. (2016). *The learning economy and the economics of hope*. Anthem Press.

Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, *31*(2), 247-264. http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1

Malerba, F. (Ed.). (2004). *Sectoral systems of innovation: Concepts, issues and analyses of six major sectors in Europe*. Cambridge University Press.

Malerba, F., & Mani, S. (Eds.). (2009). *Sectoral systems of innovation and production in developing countries: Actors, structure and evolution*. Edward Elgar.

Markard, J., & Truffer, B. (2008). Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. *Research Policy*, *37*(4), 596-615. https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.01.004

Nelson, R. R., & Sampat, B. N. (2001). Making sense of institutions as a factor shaping economic performance. *Journal of Economic Behavior & Organization*, *44*(1), 31-54. http://doi.org/10.1016/S0167-2681(00)00152-9

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). (1997). *Regulatory reform and innovation*. https://www.oecd.org/sti/inno/2102514.pdf

Peraza Castaneda, E. H. (2019). *La dinámica del sistema sectorial de innovación de la industria agroalimentaria en El Salvador desde una perspectiva evolucionista* [tesis de doctorado, Universidad de Valladolid]. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/36274/Tesis1527-190617.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Porter, M. E. (1990). The competitive advantage of nations. *Harvard Business Review*, *68*(2), 73-93. https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=6105

Ruiz López, S., & Colin Salgado, M. (2010). Innovación, propiedad intelectual y competitividad. La denominación de origen como estrategia de competitividad para la industria del calzado de León, Guanajuato. *Revista Científica Teorías, Enfoques y Aplicaciones en las Ciencias Sociales*, *2*(4), 33-44. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3991378

Sánchez, A. M. (2021, 7 de mayo). Colombia es el segundo mayor productor de Panela a nivel mundial con 16 % del mercado. *Agronegocios*.

https://www.agronegocios.co/agricultura/colombia-es-el-segundo-mayor-productor-de-panela-a-nivel-mundial-con-16-del-mercado-3165753#

Schumpeter, J. (1943). *Capitalism, socialism and democracy*. Harper.

Szogs, A., Cummings, A., & Chaminade, C. (2011). Building systems of innovation in less developed countries: The role of intermediate organizations supporting interactions in Tanzania and El Salvador. *Innovation and Development*, *1*(2), 283-302. https://doi.org/10.1080/2157930X.2011.615601

Teubal, M., Yinnon, T., & Zuscovitch, E. (1991). Networks and market creation. *Research Policy*, *20*(5), 381-392. http://dx.doi.org/10.1016/0048-7333(91)90064-W

Van Geenhuizen, M., & Nijkamp, P. (1999). *The learning capability of regions: Patterns and policies*. Vrije Universiteit Amsterdam.



Capítulo 22

Internacionalización de la gestión del conocimiento en el Convenio de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (Cimpa)

Andrew Roberts Cummings y Jaime Humberto Sierra González

Resumen

A partir de un estudio de caso, en este capítulo se explora la intermediación de conocimiento innovador a nivel internacional realizada por parte del Convenio de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (Cimpa). Las evidencias principales para la elaboración del estudio fueron generadas mediante la realización de una serie de entrevistas semiestructuradas en profundidad con varios protagonistas de la evolución de la internacionalización del conocimiento generado por el Cimpa hacia varios países de América Latina, por medio de diferentes mecanismos, como cursos y pasantías, entre otros. Se evidencia, exploratoriamente, que la experiencia internacional del Cimpa, actual sede de AGROSAVIA, es emergente, contingente y poco institucionalizada y reconocida a nivel interno, a pesar de exhibir importantes resultados e impactos entre los beneficiarios de tal intermediación en el marco de la cooperación con coaliciones de actores impulsores de trayectorias innovadoras de pequeña agroindustria rural de la panela en América Latina.

Palabras clave: panela, transferencia de tecnología, asistencia técnica, innovación tecnológica, internacionalización del conocimiento

Introducción

En este capítulo se presenta, analíticamente, la trayectoria de la generación e intermediación internacional de conocimiento innovador desde la sede Cimpa (ICA-Holanda) de AGROSAVIA, mediante una diversidad de mecanismos, hacia actores que están impulsando iniciativas de pequeña agroindustria rural de la panela en diferentes países latinoamericanos.

La investigación reconoce explícitamente la importancia de la internacionalización de sus prácticas de intermediación de conocimientos innovadores en los diferentes momentos históricos de su evolución como organización. Además, busca comprender analíticamente las prácticas y el alcance de las capacidades del Cimpa como organización generadora e intermediaria de conocimientos innovadores, como actor del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTI) colombiano, actuando a nivel internacional para incidir en las trayectorias tecnológicas de la producción artesanal tradicional de la panela, en sus diversas formas y derivados, en América Latina.

Esta es una contribución a la literatura sobre las dinámicas de coevolución de la pequeña agroindustria panelera en diferentes países de la región latinoamericana, pues analiza exploratoria y críticamente la gestión internacional de los conocimientos innovadores del Cimpa. Se espera que este análisis fortalezca las decisiones estratégicas para que vigoricen el papel del Cimpa, como centro de excelencia regional, dentro de AGROSAVIA.

En este capítulo se reportan resultados de la primera investigación (según nuestro conocimiento) sobre la internacionalización de las organizaciones intermediarias del conocimiento (OIC) del SNCTI colombiano. Las connotaciones particulares, por ser un caso de intermediación de conocimiento para la innovación en el marco de la colaboración Sur-Sur, marcan especificidades que diferencian la práctica del Cimpa de los esquemas de colaboración Norte-Sur para el desarrollo. Se considera que el caso es particularmente

relevante para la discusión sobre el desarrollo de las cadenas de valor de la pequeña agroindustria rural, la manufactura artesanal en la región y la variedad de los destinatarios de los procesos de intermediación internacional de conocimiento, que incluye principalmente a pequeños productores paneleros, técnicos de organizaciones no gubernamentales (ONG) de distinto tipo e instancias estatales. Los tipos de intermediarios y el contexto de tal función varían entre países y sistemas de innovación debido a sus particularidades, y el Cimpa es considerado como un caso atípico.

Marco analítico y metodológico

El Cimpa es intermediario de conocimientos innovadores en cuanto "organización u organismo que actúa como agente o intermediario en cualquier aspecto del proceso de innovación entre dos o más partes" (Howells, 2006). Sin embargo, la intermediación del Cimpa no está bien definida como práctica organizacional, y no hay claridad sobre su inicio y final ni sobre cuándo la interacción entre los actores se torna en intermediación. Entonces, la intermediación del conocimiento del Cimpa a nivel internacional se conceptualiza de forma amplia, enfocando la atención en los mecanismos que facilitan directa o indirectamente el flujo del conocimiento innovador generado por el Cimpa hacia otros contextos de América Latina en los que se ha asimilado dinámicamente por parte de diferentes actores que lo integran en sus procesos de mejoramiento (*upgrading*) o innovación en pequeñas unidades productivas agroindustriales rurales y, más ampliamente, en los sistemas agroalimentarios localizados (SIAL) de la panela y la guayaba (Boucher et al., 2012; Rodríguez-Borray, 2010; Rodríguez-Borray & Rangel-Moreno, 2005).

Desde una perspectiva sistémica, la capacidad de innovación colectiva de los actores en los SIAL de producción panelera depende sustantivamente de las capacidades de actores como el Cimpa para intermediar conocimientos innovadores, lo que facilita las conexiones sinérgicas entre los actores que generan el

conocimiento innovador y su asimilación dinámica para aplicarlos en iniciativas innovadoras. Las conexiones con centros de excelencia en busca de generar y gestionar conocimiento innovador en el contexto de las cadenas globales de valor son una capacidad fundamental para los actores de contextos territoriales cuyos sistemas nacionales de ciencia, tecnología e innovación son fragmentados, estructuralmente débiles, jerárquicos, estatales, verticales, débilmente financiados, sin vinculación externa, etc. (Sierra-González, 2021). Dichos sistemas "parecen ser más fragmentados que sistémicos, tienen una densidad baja de relaciones nacionales innovadoras y dependen esencialmente de la innovación traída desde afuera" (Arocena & Sutz, 2010). Aunque la mayoría de los actores de un sistema de innovación funcional están presentes en estas experiencias, faltan los vínculos críticos y los marcos institucionales necesarios para facilitar la innovación (Szogs et al., 2011).

En este contexto, el papel del Cimpa en la intermediación internacional de conocimientos innovadores implica procesos de aprendizaje propios y la asimilación dinámica de esos conocimientos innovadores por parte de otros actores, para construir las capacidades requeridas. El Cimpa debe conocer bien a los actores con quienes trabaja, sus trayectorias y las dinámicas innovadoras emergentes para facilitar el aprendizaje interactivo, los diálogos de saberes innovadores y la generación de "espacios de aprendizaje interactivo" (Arocena & Sutz, 2010), con el fin de habilitar la asimilación dinámica del conocimiento innovador intermediado.

La intermediación del conocimiento innovador en contextos internacionales como los descritos, en los que la distancia y el desconocimiento de las particularidades locales agregan complejidad, requiere capacidades específicas para insertarse estratégicamente de diferentes formas en ciclos de dinámicas interconectados de generación, intermediación, asimilación dinámica y aplicación del conocimiento innovador. En el caso específico del Cimpa, tal intermediación se describe brevemente en la figura 22.1.

Este enfoque facilita el análisis de la internacionalización de la gestión del conocimiento innovador del Cimpa, pues reconoce la relación entre la generación e intermediación del conocimiento y su asimilación dinámica para aplicar tal conocimiento del lado de los usuarios.

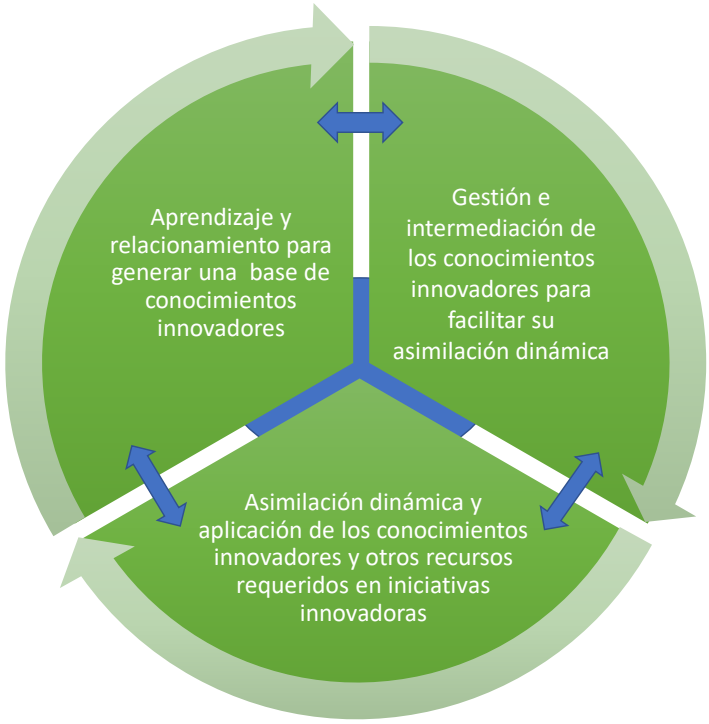


Figura 22.1. El papel del Cimpa como OIC internacional.

Fuente: Elaboración propia

La metodología usada es mixta. Inicialmente, se realizó una revisión documental en busca de datos cuantitativos (p. ej., número de misiones, destinos y funcionarios participantes) y cualitativos (p. ej., objetivos y resultados de las iniciativas) en documentos institucionales y otras fuentes bibliográficas públicas sobre la internacionalización de las actividades del Cimpa, aunque no fue posible encontrar evidencia de la institucionalización de prácticas de internacionalización en los documentos institucionales.

Más bien, se localizaron algunos documentos de distinta naturaleza que proporcionaron evidencia genérica sobre las actividades de transferencia internacional de conocimiento desarrolladas por miembros de la entidad.

Posteriormente, se realizó una serie de entrevistas semiestructuradas en profundidad con diferentes funcionarios y exfuncionarios de la organización. Como resultado de las entrevistas y de la triangulación con la información bibliográfica disponible, se pudo realizar una línea de tiempo, con hitos históricos, en la que se contextualizan con precisión las distintas acciones internacionales, sus principales factores y mecanismos, así como los resultados alcanzados. Esta aproximación se complementa con la doble línea de tiempo que muestra la evolución organizacional histórica del Cimpa en función de su misionalidad inicial y los hitos principales de su práctica de intermediación internacional del conocimiento, práctica que es emergente, contingente y no institucionalizada a nivel organizacional (anexo 22.1).

Resultados y discusión. Breve historia de la intermediación internacional del Cimpa: conocimiento desarrollado de Colombia para el mundo

A continuación, se presenta una caracterización analítica de la evolución de la práctica de intermediación internacionalizada del Cimpa, en la lógica de cooperación Sur-Sur, con actores de Centro y Suramérica como impulsores de la innovación en las trayectorias tecnológica y empresarial de sus propios SIAL paneleros. La sección finaliza con una discusión analítica de los diferentes mecanismos de intermediación evidenciados en los diversos casos.

Intermediación en diferentes contextos nacionales

El Cimpa inicia sus actividades en 1985, y en 1986 se empiezan a insinuar sus conexiones internacionales mediante los contactos adelantados por Kees de Witt, un neerlandés responsable del convenio que dio lugar a su creación con las representaciones diplomáticas de Perú, Honduras y Guatemala; luego, en 1987, se establecen vínculos con autoridades estatales de Venezuela y se firma un convenio de cooperación con autoridades de Ecuador. A continuación, se profundiza en el análisis descriptivo de las dinámicas que caracterizaron las prácticas de internacionalización del Cimpa en los tres territorios de mayor incidencia: Venezuela, Ecuador y Centroamérica.

Venezuela

El caso de Venezuela es emblemático porque ilustra el proceso y los mecanismos que emergieron para canalizar el flujo de conocimiento —de diversos tipos— que fue intermediado por el Cimpa y asimilado por diversos actores interesados en innovar en sus prácticas productivas de la panela. Según Hugo García, exdirector del Cimpa, el primer acercamiento se dio hacia 1987 con la Universidad del Táchira, a través de una docente que trabajaba en procesamiento agronómico. Posteriormente, ella realizó una visita al Cimpa para aprender, en diálogo con integrantes del equipo, sobre el mejoramiento de los trapiches paneleros. Cuando regresó a su país, se dio inicio al flujo de conocimiento hacia un número indeterminado de trapiches en diferentes estados de Venezuela, que lograron realizar innovaciones en sus sistemas tecnológicos de producción con base en su aprendizaje sobre la tecnología desarrollada en el Cimpa.

Después de esto, Gonzalo Rodríguez-Borray, investigador del equipo del Cimpa, fue invitado a Venezuela para estudiar cómo se había implementado la tecnología transferida, y la relación continuó de forma fructífera hasta 2004, cuando esta se interrumpió debido a las diferencias entre los liderazgos políticos nacionales de ambos países.

Ecuador

En cuanto a Ecuador, la primera visita se programó en 1987 por solicitud del ministro de Agricultura, y en 1989 se programó una segunda con la intención de la Embajada de los Países Bajos de instalar una sede Cimpa allí, rasgo indicativo de la intencionalidad de incidencia internacional intrínseca en el acuerdo de cooperación que le dio origen al Cimpa. Aunque se dieron las condiciones necesarias, dicha expectativa nunca se materializó; sin embargo, en otra escala de interacción, el entonces director, Hugo García, y Kees de Witt realizaron una visita a la zona de Pastaza y entablaron lazos directos con pequeñas asociaciones de productores paneleros que se interesaron por aprender y aplicar los desarrollos tecnológicos innovadores llevados a cabo por el Cimpa.

En el marco de este relacionamiento, coordinaron una visita de aprendizaje a las instalaciones del Cimpa en Barbosa, Santander, para tomar los cursos ofrecidos, y entre 1991 y 1995 realizaron en Pastaza cursos sobre la tecnología de las hornillas Cimpa y sobre el cultivo de la caña para la producción panelera. Estos cursos fueron organizados por el Ministerio de Agricultura ecuatoriano. Las dinámicas emergentes de este proceso de intermediación son reveladas por Hugo García, quien relata que en un tiempo libre del curso les enseñó a los asistentes a hacer panela granulada, tema que no hacía parte del curso. Consecuentemente, este producto fue desarrollado para la exportación a Italia gracias a conexiones facilitadas por un sacerdote de la Iglesia católica ecuatoriana. Aunque la dinámica de producción y exportación de panela granulada no logró ser sostenible en el tiempo luego del retiro de esta conexión con el mercado italiano, la difusión de las prácticas productivas y el reconocimiento del potencial de la venta de este producto innovador en el mercado internacional generaron una dinámica asumida por productores y agentes comerciales de otras localidades de Ecuador.

Es así como años después, desde Ecuador, un grupo de productores paneleros identificaron al Cimpa como un centro de

excelencia en la generación de tecnología innovadora, y priorizaron la inversión de sus limitados recursos, provenientes de una fuente de cooperación internacional, para realizar una visita de aprendizaje al Cimpa. De esta forma, se organizó una ruta de aprendizaje para conocer de primera mano, de productor a productor, en un diálogo de saberes facilitado por técnicos expertos del Cimpa, las alternativas tecnológicas que luego implementaron en iniciativas innovadoras en sus trapiches en Ecuador.

Adicionalmente, en 2014, un grupo de técnicos asociados a la misma experiencia ecuatoriana organizó una ruta de aprendizaje similar con el Cimpa, aunque con mayor interacción entre técnicos. Según Julio Ramírez, exdirector del Cimpa,

> fueron dos personas técnicas que venían, claramente, a contactar, pues sí, al Cimpa [...], pero ellos querían llevar la tecnología de trapiches y de construcción de hornillas. Ellos sabían que acá había una oferta de servicios que podían contratar y podían vender en el Ecuador. Y así, aunque el punto directo de contacto era el Cimpa, después pidieron el contacto de uno de los constructores de trapiches, de hornillas y molinos, para entrar en la dinámica comercial de venta de las tecnologías de origen del Cimpa. Eran dos personas independientes que venían con esa finalidad y, por supuesto, a ver qué tecnologías tenía AGROSAVIA. (Comunicación personal, 12 de junio, 2021)

Centroamérica

De forma similar a los casos de Venezuela y Ecuador, la relación de trabajo del Cimpa con Centroamérica empezó con las primeras visitas de De Witt a Guatemala, Panamá y Nicaragua, en 1989, pero sin conseguir los resultados esperados de las relaciones formales con las instancias gubernamentales.

Posteriormente, las interacciones más importantes del Cimpa en Centroamérica fueron realizadas en coordinación con ONG de distintos tipos o directamente con productores. En 1991, el Cimpa fue contactado y estableció una relación interinstitucional

con actores vinculados a la Iglesia católica que trabajaban en el territorio de Choluteca, Honduras. El conocimiento innovador del Cimpa fue intermediado en coordinación con estas organizaciones, con el apoyo financiero de instituciones internacionales de la misma Iglesia (obispos de Honduras, más un aporte de obispos alemanes). Un técnico-investigador del Cimpa, Gilberto Sandoval, fue delegado para realizar estos procesos, y realizó las capacitaciones para diseñar y construir plantas productoras de panela en bloque y granulada.

Sandoval acompañó a los productores en una modernización del proceso de producción tradicional, para luego arribar a la producción de panela granulada, aunque con tecnología bastante básica. Sandoval trabajó con los actores de la Iglesia católica presencialmente, en un primer momento, y después siguió apoyándolos a distancia. El exdirector del Cimpa Hugo García afirma que este trabajo tuvo una relevancia que trascendió más allá de Choluteca, ya que

> ellos se convirtieron, prácticamente, en un punto de difusión de tecnología en panela para todo Centroamérica [...]; fueron los que crearon los programas de difusión hacia varias regiones, aun hacia la parte del sur de México. Entonces, allí [en Choluteca] fue la Iglesia católica, con su grupo, quien estuvo trabajando, principalmente, y de ahí se dispersó la tecnología para allá. (Comunicación personal, 21 de mayo, 2021)

En el caso de El Salvador, a principios del nuevo siglo, un grupo de paneleros del Valle de Jiboa, una región tradicionalmente panelera de ese país, estaba buscando alternativas para evitar la destrucción de sus medios de vida, basados en pequeñas empresas familiares del sistema agroalimentario panelero. Ellos encontraron en la panela granulada una alternativa innovadora, y en el Cimpa, el centro de excelencia del cual podrían aprender. Llegaron a conformar la cooperativa Acopanela, con la motivación de aplicar estos conocimientos innovadores, para mejorar sus procesos productivos y generar la panela granulada como producto de novedad en la región centroamericana (Cummings & Cogo, 2016).

En el contexto de dos proyectos financiados por el Fondo Multilateral de Inversiones, del Banco Interamericano de Desarrollo (BID-Fomin), e implementados directamente por Acopanela con el objetivo de fortalecer sus capacidades de producción y comercialización de la panela, se realizó una primera visita en el Cimpa a mediados de los años 2000. Esta fue estructurada institucionalmente por el Cimpa para permitirles a los productores salvadoreños conocer su sede y sus laboratorios de producción, y, principalmente, para que tuvieran la oportunidad de profundizar en el conocimiento de los diferentes modelos de implementación de su tecnología innovadora en los trapiches de los productores de la zona.

El técnico Gilberto Sandoval fue parte del equipo que recibió a la delegación de Acopanela en el Cimpa, y terminó trabajando para ellos como consultor experto internacional en sus proyectos del BID-Fomin. Con este trabajo se buscó realizar la modernización en la forma de producción y lograr la calidad requerida para la exportación de panela tradicional, y también empezaron con la producción innovadora de panela granulada. Con su asesoría, Acopanela inició la implementación progresiva de algunas tecnologías en sus trapiches familiares, construyendo primero un "trapiche modelo", con buenas prácticas de manufactura, necesarias para la exportación de la panela en bloque, pero producida y empacada de forma higiénica, hacia el mercado "nostálgico" de salvadoreños y otros migrantes de Centroamérica en Estados Unidos. Posteriormente, realizaron un salto innovador para incorporar la tecnología más compleja del Cimpa, gracias al diseño realizado por Sandoval, para construir una fábrica tipo "central de mieles". La tecnología aplicada en este proyecto fue importada a través de una empresa manufacturera seleccionada para fabricar el diseño *ad hoc* con tecnología desarrollada por el Cimpa.

Los productores de Acopanela también recibieron asesoría de una ingeniera en procesos industriales que, aunque no había trabajado en el Cimpa, sí tenía experiencia en un trapiche donde se aplicaba la tecnología de la entidad en una escala apropiada y que sirvió para el caso de Acopanela.

Como antecedente de este proceso y evidencia de la dinámica de difusión de la tecnología Cimpa en Centroamérica, el primer contacto directo de los productores de Acopanela con esta tecnología fue a través de los productores de panela en Honduras. Posteriormente, también realizaron una ruta de aprendizaje para conocer la experiencia de la Asociación Fundación para la Cooperación y el Desarrollo Comunal de El Salvador (Cordes), que había implementado una tecnología avanzada del Cimpa para moliendas de mediana escala y la producción de panela granulada mediante un sistema de bandejas. Los aprendizajes de estos esfuerzos de exploración permitieron a los productores experimentados de Acopanela asimilar dinámicamente la idea de la producción de panela granulada e implementarla en sus trapiches de tecnología artesanal básica. De allí la motivación para buscar comunicación directa con el Cimpa.

En el caso de Panamá, funcionarios del Cimpa trabajaron con el Ministerio de Agricultura panameño para caracterizar la industria y apoyar a los productores de una región de dicho país; sin embargo, no se logró consolidar esta relación. En Costa Rica y Guatemala, técnicos-investigadores del Cimpa trabajaron directamente con los productores de regiones paneleras, y actualmente existe una producción significativa de panela granulada en estos dos países.

Mecanismos de la intermediación de conocimientos innovadores

Los casos descritos demuestran cómo emergieron y evolucionaron los diferentes canales y mecanismos de relacionamiento internacional del Cimpa para la intermediación de conocimientos innovadores generados en Colombia con actores foráneos. En efecto, debido probablemente a que los entornos vecinos no difieren mucho en la configuración y características de los SIAL relacionados con la producción panelera a pequeña escala, la transferencia de conocimiento agenciada por el Cimpa se ha producido casi siempre gracias a *contactos contingentes* con

pequeños productores o referentes técnicos de organizaciones intermediarias de apoyo que trabajan con estos productores. Sin embargo, en algunos casos hay también evidencia de relaciones establecidas por el Cimpa con instancias estatales, especialmente ministerios asociados a la producción panelera, y otras instancias de cooperación internacional para el desarrollo interesadas en apoyar la pequeña producción familiar panelera.

Un mecanismo más formalmente estructurado de contacto e interacción entre el Cimpa y los actores impulsores de la innovación tecnológica en la región han sido los cursos realizados en la sede de Colombia, con participación de actores internacionales. En varios casos, la participación en estos cursos ha abierto la puerta a relaciones de colaboración más profundas entre el Cimpa o personas con conocimientos allí generados y actores que buscan impulsar iniciativas de innovación en las trayectorias de producción del sector en sus respectivos países. Este mecanismo de formación ha dado lugar a interacciones regionales relativamente sostenidas en el tiempo con actores de Costa Rica, Brasil, Ecuador y Perú.

En algunos casos consolidados e institucionalizados de cooperación del Cimpa con actores internacionales (como Venezuela), se han realizado procesos de formación facilitados por expertos de la entidad en terceros países. Por ejemplo, en el marco de una relación establecida con actores públicos, empresariales y universitarios de Venezuela, se realizaron cursos para compartir conocimientos innovadores generados por los equipos de investigación del Cimpa con actores técnicos y productores.

La relación de colaboración con Venezuela involucró la gestión internacional del conocimiento, más allá de la intermediación a través de cursos y asistencia técnica, al incluir también la generación de conocimiento por medio de estudios de diagnóstico socioeconómico y sociotécnico de los SIAL de la panela. De hecho, una parte de los conocimientos innovadores que los equipos técnicos del Cimpa intermediaron o compartieron tenía que ver

con el diseño, la realización y la utilización de diagnósticos enmarcados en procesos para fomentar la innovación tecnológica y empresarial de la producción panelera inmersa en sus SIAL.

Los casos salvadoreños y ecuatorianos evidencian la importancia del contacto contingente y la organización y facilitación emergente de las "rutas de aprendizaje" como punto de partida de procesos posteriores de intermediación y asimilación dinámica de la tecnología Cimpa en iniciativas innovadoras de grupos de productores paneleros locales.

Como demuestra la experiencia de El Salvador, la intermediación de conocimientos innovadores generados por el Cimpa no siempre ha sido realizada directamente por personal de la entidad, sino también por personas que alguna vez fueron parte del equipo de investigación y transferencia tecnológica del Cimpa y que, posteriormente, han realizado trabajos como consultoras internacionales especializadas con base en el conocimiento adquirido en la entidad.

Otro mecanismo indirecto de intermediación de conocimiento generado en el Cimpa es la dinámica de comercialización internacional de tecnología Cimpa (con entrenamiento incluido) por parte de empresas fabricantes colombianas. En estos casos, el mecanismo de intermediación ha sido la externalización del conocimiento basado en desarrollos internos (p. ej., las hornillas) que han sido apropiados por personas con conocimientos técnicos, en muchos casos ex-Cimpa, quienes se han convertido en fabricantes de elementos tecnológicos esenciales para el proceso de producción de panela granulada.

Actualmente, este mecanismo de flujo a través de empresas que usan la base tecnológica Cimpa para la exportación de maquinaria impulsa la incorporación de la innovación en las trayectorias tecnológicas de la producción panelera en Centroamérica (El Salvador, Guatemala, Costa Rica y Honduras). En efecto, en la actualidad, algunas empresas ofrecen proactivamente sus servicios de

diagnóstico de sistemas productivos de panela y de diseño de propuestas para la instalación de plantas complejas, mediante "paquetes tecnológicos completos" de trapiches semiindustrializados, para, posteriormente, exportar la maquinaria, asesorar su implementación y realizar alianzas para comprar y exportar la producción a mercados internacionales que ellas han abierto.

En este proceso de intermediación de conocimiento y exportación de tecnología, la propuesta tecnológica ha evolucionado para incluir calderas de producción de vapor para regular la temperatura del proceso productivo. Estas tecnologías no fueron desarrolladas inicialmente por el Cimpa, aunque actualmente la entidad y AGROSAVIA han introducido vapor al procesamiento.

Aunque esta empresa no reconoce abiertamente en su actual presentación comercial una vinculación con el Cimpa, es notable su reconocimiento implícito de la importancia de la tecnología Cimpa al llevar a participantes de sus cursos a las rutas de aprendizaje de la entidad. Esta empresa es actualmente líder en la exportación de tecnología panelera colombiana hacia Centroamérica.

Este mecanismo de intermediación de conocimiento tecnológico innovador originado en el Cimpa y los posteriores desarrollos tecnológicos basados en otras fuentes de conocimiento innovador, por medio de empresas fabricantes y exportadoras de maquinaria y de servicios asociados de conocimiento para su selección, diseño e implementación, también explican en buena parte el desarrollo actual de un sector de producción y exportación de panela granulada en Perú.

A través del equipo de investigadores del Cimpa, existe otro mecanismo de flujo no trazable de conocimiento: la dirección de trabajos de investigación en diversas universidades a nivel de pregrado y posgrado. También, se han publicado, en diversos medios, documentos (como el cálculo detrás del diseño de las hornillas) que están públicamente disponibles para actores interesados.

En resumen, los mecanismos de intermediación del conocimiento a nivel internacional identificados en el caso del Cimpa son los siguientes: 1) cursos de formación para productores y técnicos en su sede, con participación de actores internacionales; 2) facilitación de rutas de aprendizaje y prácticas para productores y técnicos, con la posterior implementación de las tecnologías Cimpa; 3) cursos de formación técnica para productores y técnicos en otros países, y 4) servicios de asesoría, diagnóstico y propuestas de innovación tecnológica/empresarial en contextos internacionales por parte de técnicos de la entidad.

La internacionalización de las prácticas de gestión del conocimiento para la innovación en la producción de panela fue una intencionalidad inicial y una práctica emergente regular del Cimpa, aunque nunca fue institucionalizada formalmente más allá de su eventual participación en proyectos de cooperación internacional Sur-Sur. En efecto, con base en las entrevistas realizadas, se sabe que la transferencia/difusión internacional de tecnología Cimpa para el rescate y desarrollo competitivo de SIAL de la pequeña agroindustria rural de la panela fue explícitamente integrada en el convenio firmado entre el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)-Cimpa y la cooperación neerlandesa; sin embargo, nunca ha sido institucionalizada en los documentos formales misionales del Cimpa, ni en su planificación estratégica. Aun así, es parte de la práctica de la entidad a lo largo de su historia.

La práctica internacionalizada del Cimpa demuestra su papel como centro de excelencia regional y global de referencia en la generación y transferencia de conocimientos tecnológicos (como la "hornilla Cimpa") relevantes para la innovación en las trayectorias tecnológicas de la producción de panela, especialmente la granulada y otros subproductos de esta agroindustria artesanal en América Latina, e incluso en Haití y África. Esto ha generado impactos significativos pero desconocidos, porque no han sido estimados todavía, en las trayectorias tecnológicas y el desempeño de las empresas paneleras de América Latina y otros entornos internacionales.

Sin embargo, en los últimos años, el Cimpa no ha mantenido una intermediación internacional directa de conocimiento en materia de innovación. Más bien, existe una acción indirecta ejercida por personas con conocimientos originados en el Cimpa, pero que actúan en calidad de consultores internacionales independientes y prestan sus servicios para impulsar iniciativas innovadoras en otros países o desde empresas fabricantes y exportadoras de asesoría y tecnología, con conocimientos integrados/empaquetados de origen en el Cimpa, pero que han evolucionado hacia una mayor escala de industrialización bajo la forma de miniingenios.

Conclusiones

La intermediación internacional del conocimiento del Cimpa es un fenómeno emergente a partir del desarrollo de sus capacidades de generación e intermediación de conocimientos tecnológicos y de su interacción con redes de productores de diferentes territorios, inicialmente en Colombia, y, sucesivamente, en otras economías de la región. Además, es evidente la existencia de una relativa autonomía para gestionar proyectos financiados y ejecutados internacionalmente, como cursos para productores y técnicos foráneos.

Es una práctica contingente, realizada en función de demandas emergentes de avances, con iniciativas en distintos países de América Latina y financiamientos no sistemáticos. Es una práctica con discontinuidades en los tiempos y territorios, no explotada como fuente de recursos de financiación, sino vista como una actividad en sintonía con la misión y la visión del Cimpa.

El análisis del caso justifica una conceptualización relativamente amplia de la internacionalización de la práctica de gestión de conocimiento por parte del Cimpa, focalizada en mecanismos de "intermediación" que facilitan, directa o indirectamente, el flujo internacional del conocimiento generado por el Cimpa hacia otros contextos de América Latina o el mundo, donde es absorbido/

asimilado dinámicamente por diferentes tipos de actores, para ser integrado en procesos de mejoramiento (*upgrading*) o innovación en las trayectorias tecnológicas y empresariales de pequeñas agroindustrias rurales y, más ampliamente, en los SIAL de la panela y la guayaba. En este sentido amplio, también se considera importante el origen internacionalizado del conocimiento del Cimpa, procedente de la cooperación neerlandesa para el desarrollo, que incidió en la generación de los conocimientos tecnológicos del Cimpa relacionados con la panela. Asimismo, es clave la posibilidad de que la participación en procesos internacionalizados de gestión de conocimiento pueda generar aprendizajes relevantes para la evolución de los conocimientos del Cimpa.

Las capacidades de intermediación internacional desarrolladas se refieren a la generación de conocimientos innovadores, el diseño y la realización de cursos y la facilitación de rutas de aprendizaje para productores y técnicos paneleros (transferencia tecnológica), lo que ha generado interés y conocimientos necesarios para crear nuevas dinámicas de búsqueda/asimilación de conocimientos/tecnologías Cimpa, para incorporarlas en iniciativas innovadoras en otros países, con impactos positivos pero no estimados en la cadena latinoamericana de valor de la panela.

El Cimpa no ha demostrado interés por diseñar e implementar estrategias explícitas de intermediación internacional en materia de conocimientos innovadores, ni por realizar una práctica institucionalizada de estas actividades de internacionalización de su gestión de conocimientos innovadores. Esto es comprensible en el marco de la misión y la visión de la entidad, que se enfocan en el desarrollo endógeno de la industria panelera en los territorios colombianos. Queda, sin embargo, la inquietud sobre si, en la actualidad, la valoración de esta trayectoria histórica del Cimpa ofrece potencialidades de interés estratégico para el desarrollo futuro de AGROSAVIA.

Agradecimientos

Va un reconocimiento a Mónica Méndez, asistente de investigación del proyecto sobre OIC en Colombia (financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá y Cali), y a los directivos y expertos del Cimpa y AGROSAVIA que participaron en las entrevistas.

Referencias

Arocena, R., & Sutz, J. (2010). Emerging neoperipheral structures and gardening policies. En B. Johnson, & O. Segura (Eds.), *Systems of innovation and development: Central American perspectives*. Universidad Nacional.

Boucher, F., Espinoza Ortega, A., & Pensado Leglise, M. del R. (2012). *Sistemas agroalimentarios localizados en América Latina: alternativas para el desarrollo territorial*. Miguel Ángel Porrúa.

Cummings, A., & Cogo, E. (2016). Networking capabilities and innovation in a traditional small-scale agro-industry: The ACOPANELA Cooperative in El Salvador. En W. Siyanbola, O. Olamade, & A. Egbetokun (Eds.), *Innovation systems and capabilities in developing regions. Concepts, issues and cases*. Routledge.

Howells, J. (2006). Intermediation and the role of intermediaries in innovation. *Research Policy*, *35*(5), 715-728. https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.03.005

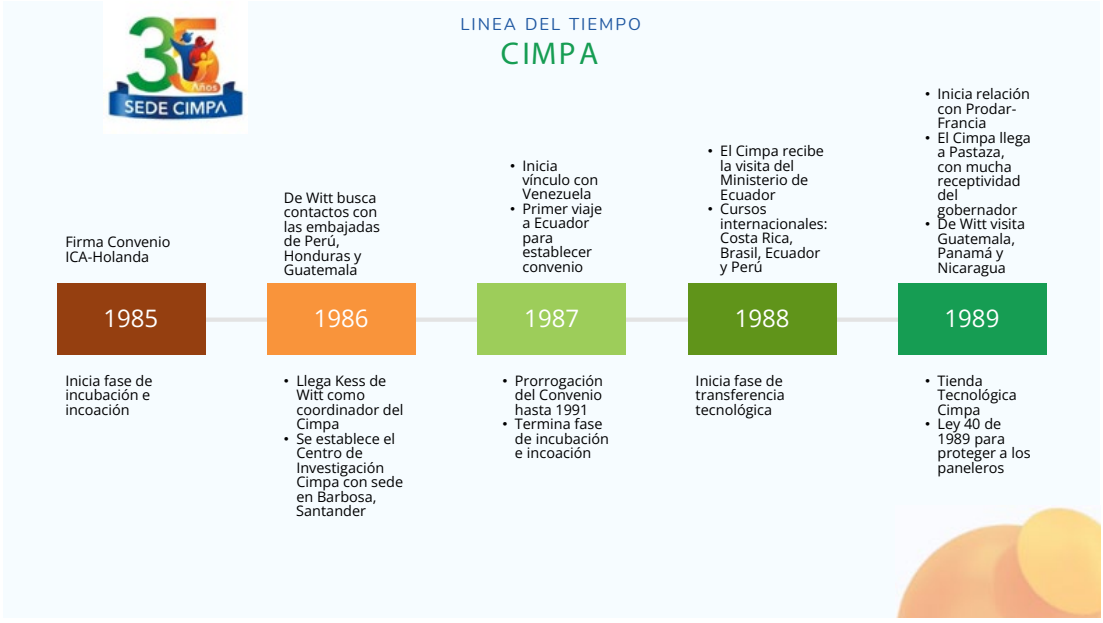
Rodríguez-Borray, G. (2010, 27-30 de octubre). *Desarrollo metodológico para la valoración de los elementos funcionales de Sistemas Agroalimentarios Localizados* [presentación en seminario]. 116th EAAE Seminar: "Spatial dynamics in agri-food systems: Implications for sustainability and consumer welfare", Parma, Italia. http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.95225

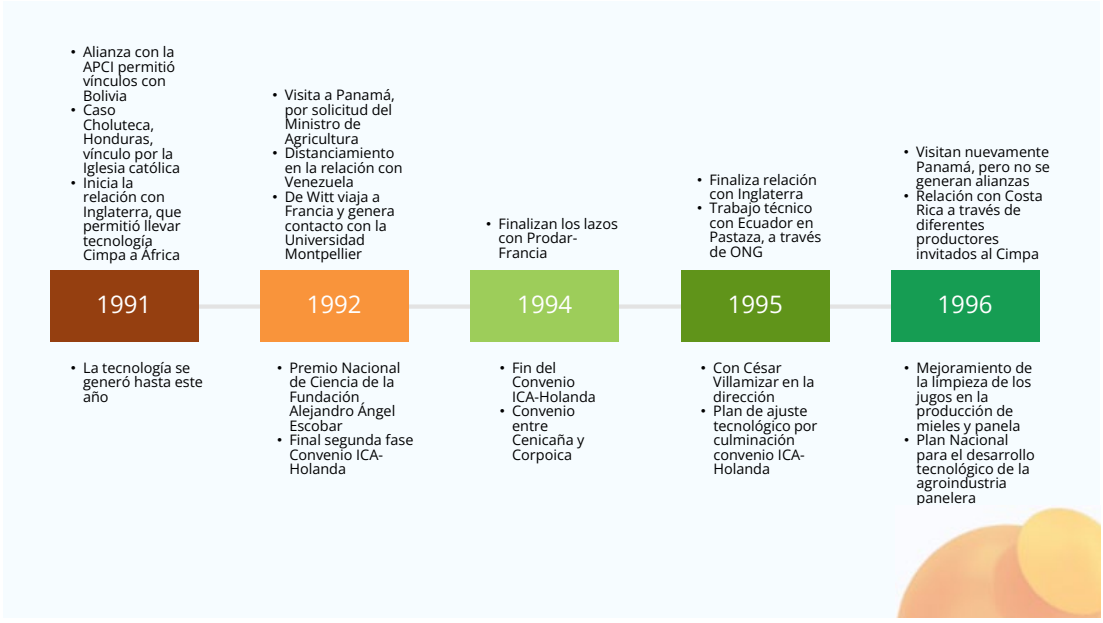
Rodríguez-Borray, G., & Rangel-Moreno, C. (2005). *Estudio del Sistema Agroalimentario Localizado, SIAL, de la concentración de fábricas de bocadillo de guayaba en las provincias de Vélez y Ricaurte en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12881/44101_56233.pdf?sequence=1&isAllowed=y

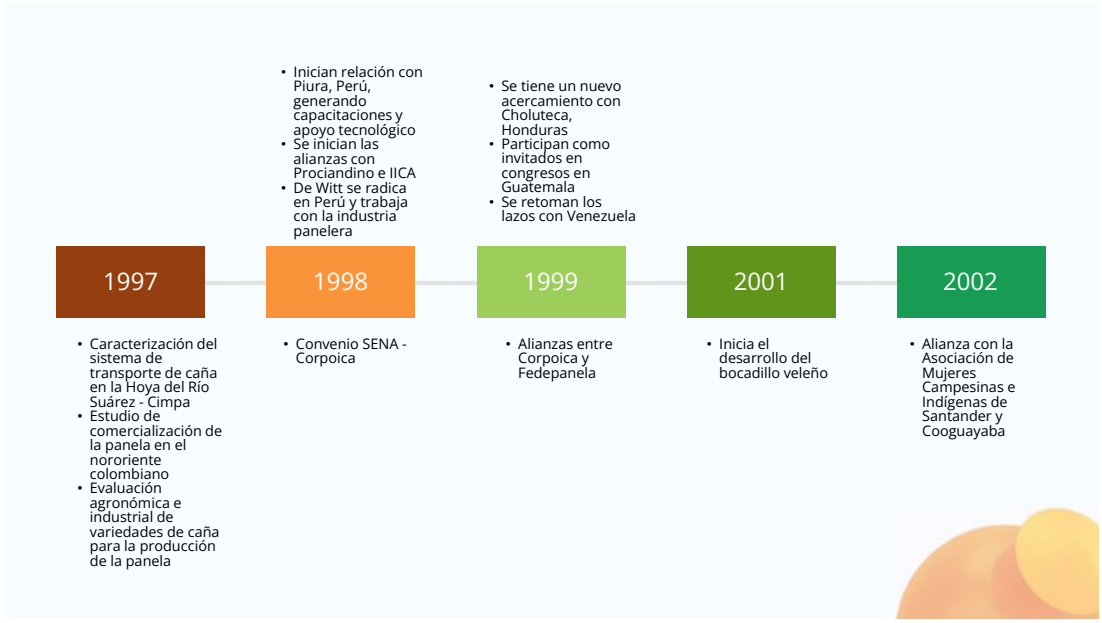
Sierra-González, J. (2021). *How are national and sectoral innovation systems related? A view from innovation financing in the Colombian power generation sector* [presentación en conferencia]. EU-SPRI 2021 Conference: "Science and innovation – an uneasy relationship? Rethinking the roles and relations of STI policies", Oslo, Noruega.

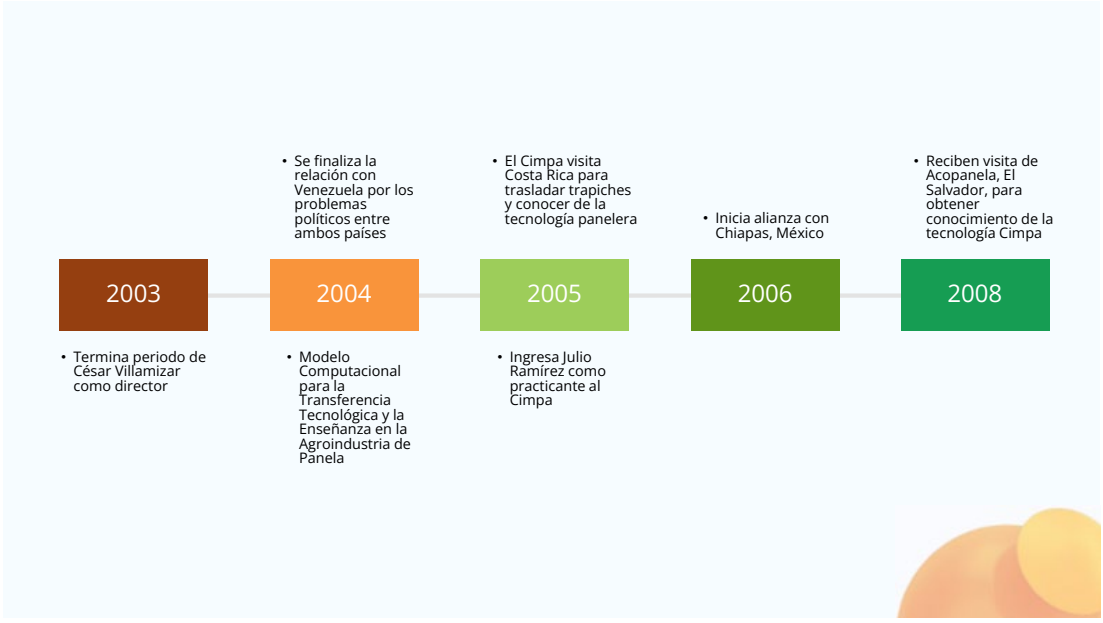
Szogs, A., Cummings, A., & Chaminade, C. (2011). Building systems of innovation in less developed countries: The role of intermediate organizations supporting interactions in Tanzania and El Salvador. *Innovation and Development*, *1*(2), 283-302. https://doi.org/10.1080/2157930X.2011.615601

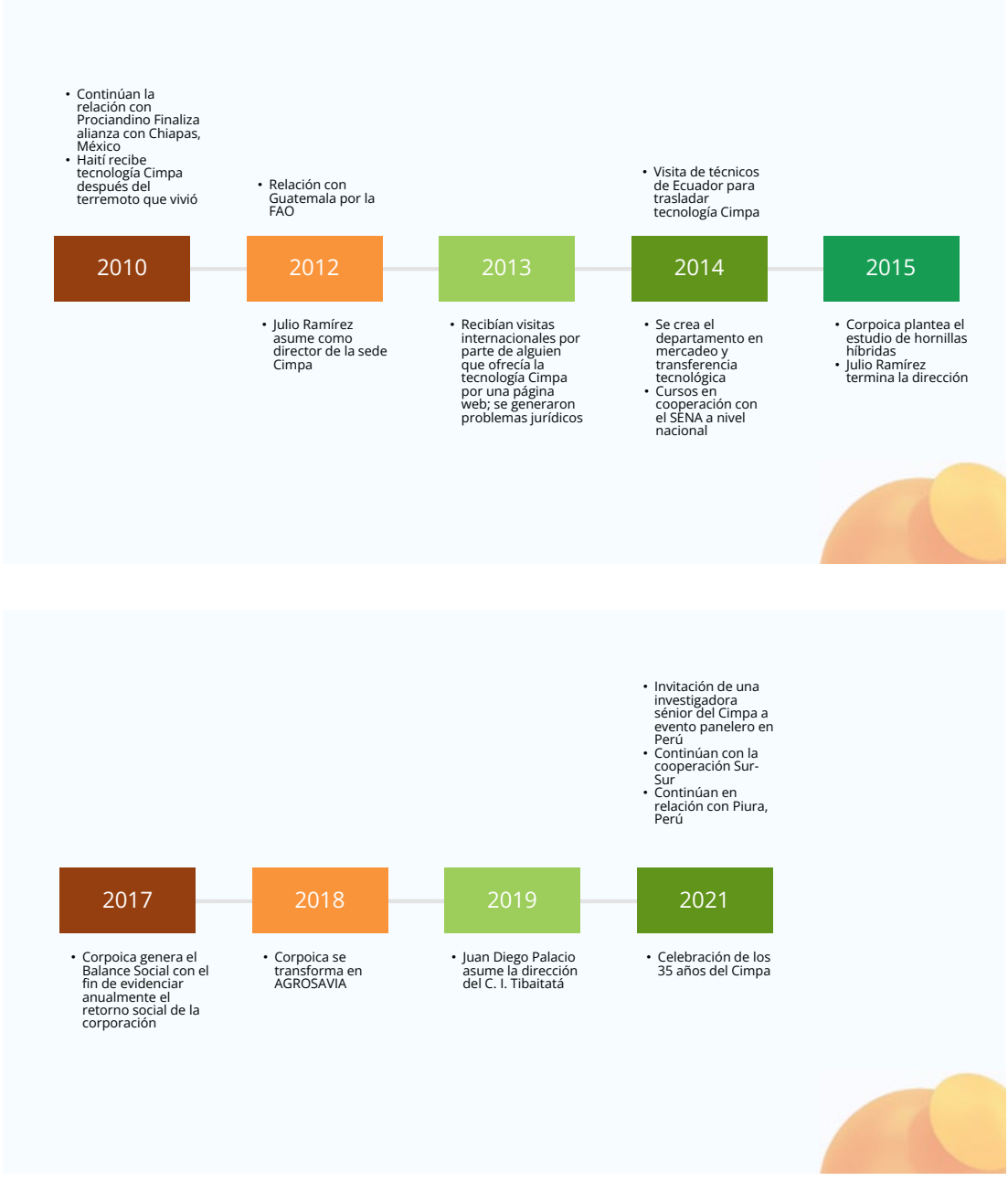
Anexo 22.1: Línea de tiempo con hitos históricos relevantes de la evolución del Cimpa y la internacionalización de su gestión de conocimiento innovador






1997
• Caracterización del sistema de transporte de caña en la Hoya del Río Suárez - Cimpa
• Estudio de comercialización de la panela en el nororiente colombiano
• Evaluación agronómica e industrial de variedades de caña para la producción de la panela
1998
• Inician relación con Piura, Perú, generando capacitaciones y apoyo tecnológico
• Se inician las alianzas con Prociandino e IICA
• De Witt se radica en Perú y trabaja con la industria panelera
• Convenio SENA - Corpoica
1999
• Se tiene un nuevo acercamiento con Choluteca, Honduras
• Participan como invitados en congresos en Guatemala
• Se retoman los lazos con Venezuela
• Alianzas entre Corpoica y Fedepanela
2001
• Inicia el desarrollo del bocadillo veleño
2002
• Alianza con la Asociación de Mujeres Campesinas e Indígenas de Santander y Cooguayaba


2003
• Termina periodo de César Villamizar como director
2004
• Se finaliza la relación con Venezuela por los problemas políticos entre ambos países
• Modelo Computacional para la Transferencia Tecnológica y la Enseñanza en la Agroindustria de Panela
2005
• El Cimpa visita Costa Rica para trasladar trapiches y conocer de la tecnología panelera
• Ingresa Julio Ramírez como practicante al Cimpa
2006
• Inicia alianza con Chiapas, México
2008
• Reciben visita de Acopanela, El Salvador, para obtener conocimiento de la tecnología Cimpa



Fuente: Elaboración propia

Terminó de diseñarse en septiembre de 2024.

Bogotá, D. C., Colombia

En este libro se explora la agroindustria panelera a través de una cuidadosa recopilación de resultados de investigación en diversas áreas del conocimiento: 1) Cultivo y manejo agronómico, 2) Transformación, industrialización y diversificación de uso de la panela, y 3) Análisis socioeconómico y ambiental de la agroindustria panelera. La obra se presenta como una valiosa fuente de referencia, con capítulos estructurados en formato de artículos científicos, por lo cual ofrece información rigurosa y de alta calidad. Este enfoque garantiza que el libro se convierta en una herramienta invaluable para todos los actores implicados en la agroindustria panelera, abarcando desde los productores hasta los investigadores y los responsables de tomar decisiones. De esta manera, la obra se posiciona como una guía esencial para comprender los desafíos y oportunidades que enfrenta este sector en su evolución continua, ofreciendo una visión completa y actualizada que contribuye al desarrollo y la innovación dentro de la agroindustria.

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria