

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 desgué, 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 entre-saque. 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 información 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 las 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:

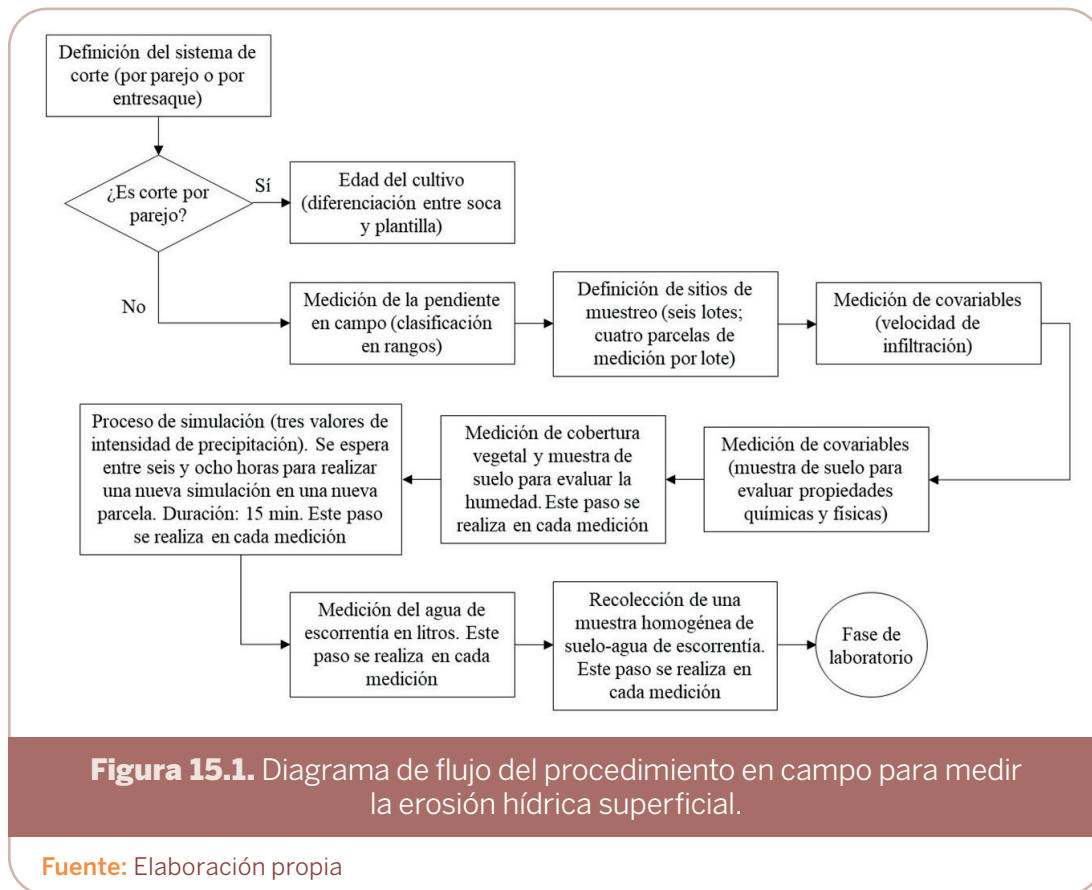
- Lote plantilla (o primera siembra) de pendiente suave
- Lote plantilla (o primera siembra) de pendiente fuerte
- Lote en corte por entresaque de pendiente suave
- Lote en corte por entresaque de pendiente fuerte
- Lote en corte por parejo de pendiente suave
- Lote en corte por parejo de pendiente fuerte

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 m² de área, ya que dentro de cada uno se ubicaron cuatro parcelas de medición de 8,91 m² (parcelas de 2

m de ancho $\times$ 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



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:

$$SP = \frac{SS}{TM} * MC \quad (15.1)$$

$$PS = \frac{SP}{8,91 * 1.000} * 10.000 \quad (15.2)$$

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 ² a	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 m²a). 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 m²a).

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 CO₂-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 CO₂ 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.

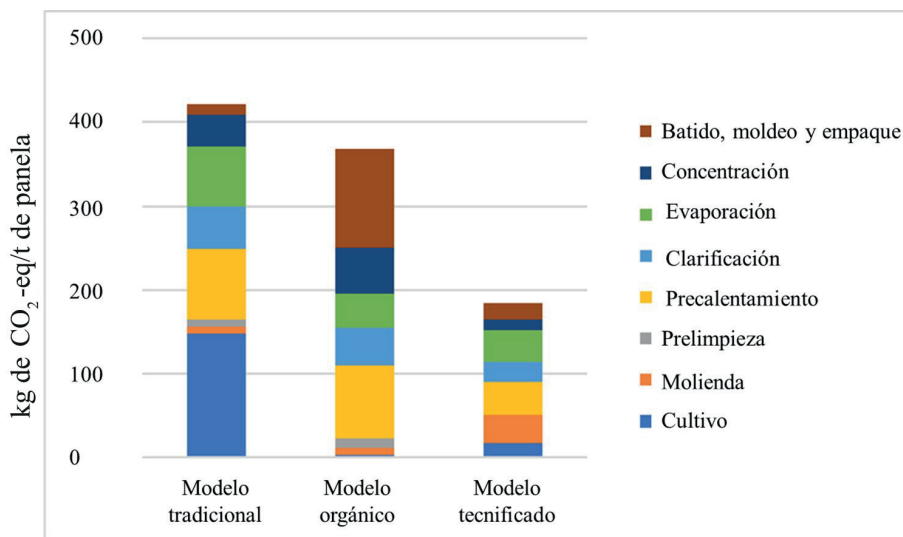


Figura 15.2. Huella de carbono por operación en los tres modelos tecnológicos de producción de panela en Cundinamarca.

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).

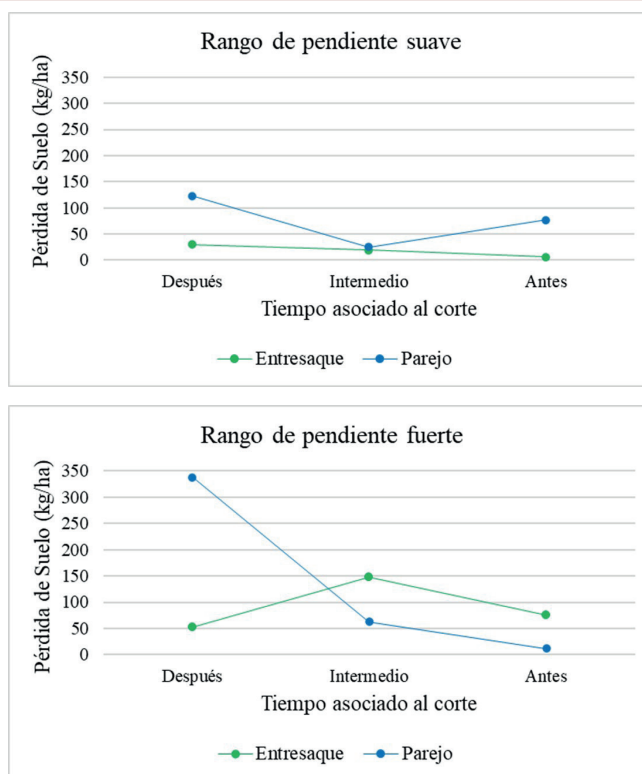


Figura 15.3. Pérdida de suelo en distintos momentos de medición asociados al corte.

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).

