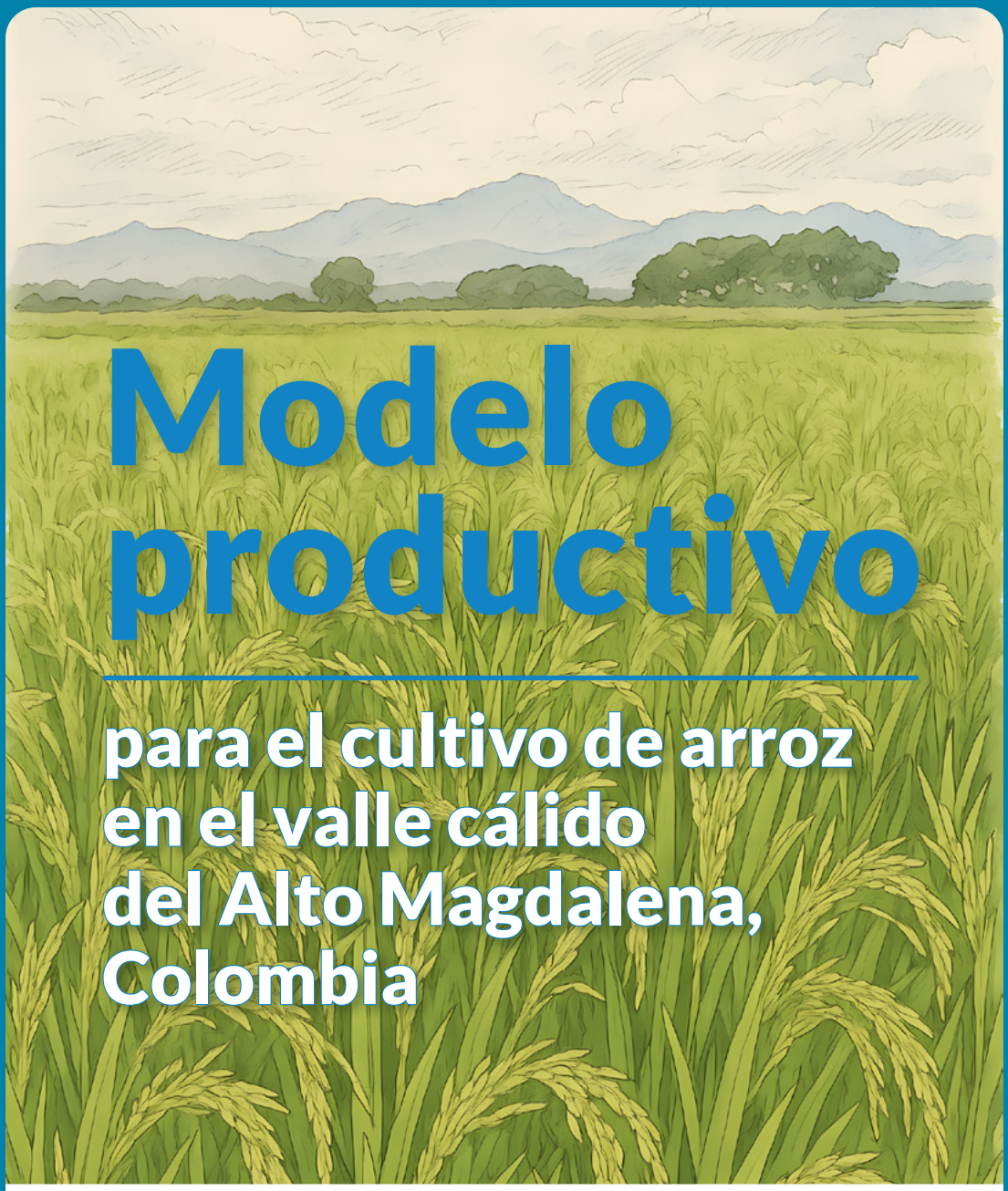


Modelo productivo

para el cultivo de arroz en el valle cálido del Alto Magdalena, Colombia

Agricultura

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

FEDEARROZ
FEDERACIÓN NACIONAL DE ARROCEROS
FONDO NACIONAL DEL ARROZ

SENA

Gobernación del Huila

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

SGR
SISTEMA GENERAL DE REGALÍAS

Modelo productivo para el cultivo de arroz en el valle cálido del Alto Magdalena, Colombia

Sofiane Ouazaa
Alefsi David Sánchez-Reinoso
Nesrine Chaali
Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios
Sonia Mercedes Polo-Murcia
José Isidro Beltrán-Medina
Kelly Johana Pedroza-Berrío
Ángela María Vargas-Berdugo
Carlos Alberto Abaunza-González
John Edinson Calderón-Carvajal
Juan Felipe Vélez-González
Kemis Lisset Sierra-Martínez

Mosquera, Colombia, 2025
Colección Alianzas AGROSAVIA

SGR
SISTEMA GENERAL DE REGALÍAS

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Centro de Investigación Nataima

Kilómetro 9, vía Espinal - Ibagué, Tolima.
Código postal 733520, Colombia

Esta publicación forma parte del proyecto "Desarrollo de estrategias ecoeficientes y transferencia de conocimiento para mejorar la productividad de pequeños productores de arroz bajo el sistema de trasplante mecanizado en el centro y norte del departamento del Huila". ID 1002132, financiado por el Sistema General de Regalías del Huila.

Colección Alianzas AGROSAVIA
Tipología: Modelo Productivo

Fecha de recepción:
12 de diciembre de 2024
Fecha de evaluación: 31 de enero de 2025
Fecha de aceptación: 27 de febrero de 2025

Primera edición digital: agosto de 2025

Editorial AGROSAVIA

editorial@agrosavia.co

Dirección editorial:
Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición:
Jorge Enrique Beltrán Vargas

Corrección de estilo:
Felipe Solano Fitzgerald

Diseño editorial y diagramación:
Sonia A. Rodríguez Rodríguez

Ilustraciones: Vecteezy.com e imágenes generadas a partir de fotografías de los autores mediante ChatGPT de OpenAI (modelo DALL·E), 2025

Citación sugerida: Ouazaa, S., Sánchez-Reinoso, A. D., Chaali, N., Jaramillo-Barrios, C. I., Polo-Murcia, S. M., Beltrán-Medina, J. I., Pedroza-Berrío, K. J., Vargas-Berdugo, A. M., Abaunza-González, C. A., Calderón-Carvajal, J. E., Vélez-González, J. F., & Sierra-Martínez, K. L. (2025). *Modelo productivo para el cultivo de arroz en el valle cálido del Alto Magdalena, Colombia*. La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7408102

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

https://co.creativecommons.net/tipos-de-licencias/

Modelo productivo para el cultivo de arroz en el valle cálido del Alto Magdalena, Colombia. / Sofiane Ouazaa [y otros once] – Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2025.

254 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)
Incluye referencias bibliográficas, ilustraciones y gráficos.
ISBN e-Book: 978-958-740-810-2

1. *Oryza sativa* 2. Cultivo 3. Cosecha 4. Tecnología poscosecha 5. Economía de la producción 6. Variabilidad del clima 7. Biodiversidad 8. Sistema de riego 9. Tolima (Colombia)10. Huila (Colombia).

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

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones ni de la información recogidas 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.

Contenido

Agradecimientos 7
Introducción general 9

1. Área geográfica, entorno ambiental y distritos de riego 11
   - Introducción 12
   - Área geográfica mundial 12
   - Área geográfica nacional 15
   - Distritos de riego del VCAM 25
     - Infraestructura de riego en el departamento de Huila 25
     - Infraestructura de riegoen el departamento del Tolima 28

2. Exigencias edafoclimáticas y variabilidad climática en el cultivo de arroz 39
   - Introducción 40
   - Exigencias edafoclimáticas 40
     - Altitud 40
     - Fotoperíodo y radiación 41
     - Temperatura 42
     - Humedad relativa 45
     - Profundidad de los suelos 46
     - Textura de los suelos 46
     - Drenaje 47
     - Régimen de humedad del suelo 49
     - Pendiente del terreno 50
     - Pedregosidad 51
     - pH 51
     - Salinidad/sodicidad (conductividad eléctrica) 52
     - Fertilidad del suelo 52
     - Fertilidad química del suelo 53

Aptitud edafoclimática del cultivo de arroz en el VCAM 54
Variabilidad climática en el cultivo de arroz 58
Impacto de la variabilidad climática 61

3. Recursos genéticos para el VCAM y fenología de la planta de arroz 65
Introducción 66
Origen y grupos genéticos 66
Morfología de la planta de arroz 68
Fenología 71
Genotipos de arroz para el valle cálido del Alto Magdalena (VCAM) 72

4. Manejo agronómico 77
Introducción 78
Sistemas de producción de arroz en el VCAM 78
Sistemas de producción rotacional y monocultivo 78
Método de siembra directa mecanizada 80
Métodos de siembra por trasplante 82
Manejo del recurso hídrico en el cultivo de arroz 87
Consumo y productividad hídrica 87
Relación agua - planta - suelo - ambiente *continuum* 90
Sistemas de riego para el cultivo de arroz en el VCAM 92
Riego por gravedad 93
Riego alternando moje y secado (AWD) 94
Riego por múltiples entradas (MIRI) 96
Productividad hídrica del arroz con las tres técnicas de riego 98
Programación de riego 102
Simulación del riego 104
Manejo de la nutrición en el sistema productivo de arroz en el VCAM 106

Manejo de arvenses en el sistema productivo de arroz en el VCAM 110
Principales arvenses limitantes en la producción de arroz 111
Estrategias de manejo de arvenses en el VCAM 113
Recomendaciones complementarias de manejo agronómico 122
Estrategias de mitigación y adaptación 122
Respuestas de las plantas de arroz a condiciones ambientales adversas 124

5. Del suelo al dato: fundamentos y prospectiva para la agricultura de precisión en el VCAM 127
Introducción 128
Propiedades de los suelos arroceros 128
Textura del suelo 129
Estructura del suelo 130
Densidad aparente 132
Porosidad 133
Movimiento del agua en los suelos arroceros 133
Variabilidad espacio-temporal de las propiedades del suelo 135
Zonas de manejo 140

6. Plagas y enfermedades de importancia económica para el cultivo de arroz y su manejo 143
Introducción 144
Plagas 144
Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) 145
Chinche del arroz (*Oebalus insularis*) 149
Polilla blanca del arroz (*Rupela albinella* Cramer) 153
Sogata (*Tagosodes orizicolus*) 156
Enfermedades 159
Enfermedades asociadas a hongos presentes en el suelo 159
Enfermedades asociadas a síntomas foliares 166
Enfermedades asociadas a síntomas en la panícula 170

7. Cosecha, poscosecha y agroindustria 173
Introducción 174
Generalidades 174
Características del grano de arroz 174
Cosecha 175
Poscosecha 178
Molinería del arroz 178
Agroindustria del arroz: transformación y tendencias en el uso residuos 182
Residuos de la poscosecha del arroz y su potencial en la industria 183

8. Indicadores económicos de la cadena de valor en el VCAM 185
Introducción 186
Indicadores económicos 186
Valor de la producción 191
Beneficios económicos de las tecnologías de riego 193

9. Servicios ecosistémicos asociados al arroz 197
Introducción 198
Servicios ecosistémicos 198
Regulación del agua 199
Apoyo a la recarga de acuíferos 199
Biodiversidad 200
Suministro de productos acuáticos 202
Huella de carbono 202
Servicios culturales 203
Ciclos de nutrientes 203

Referencias 205
Autoría 251

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro sincero agradecimiento al Sistema General de Regalías (SGR), a la Gobernación del Huila y a la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz). Así mismo, a la Universidad Surcolombiana y al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), sede La Angostura, dentro del proyecto "Desarrollo de estrategias ecoeficientes y transferencia de conocimiento para mejorar la productividad de pequeños productores de arroz bajo el sistema de trasplante mecanizado en el centro y norte del departamento del Huila", código BPIN 2021000100200, quienes fueron fundamentales para el desarrollo de las actividades.

También agradecemos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y a La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), por el acompañamiento y el respaldo a los investigadores autores durante el desarrollo del proyecto. De igual forma, a todo el equipo de investigadores, profesionales de apoyo a la investigación, asistentes de investigación y operarios que participaron en el proyecto, especialmente al Dr. Lorenzo Peláez Suárez, director del Centro de Investigación Nataima, por el apoyo ilimitado.





Introducción general

Este modelo productivo se plantea como una respuesta integral a las particularidades de la región del valle cálido del Alto Magdalena (VCAM) y los retos que presenta para el cultivo de arroz, esencial en la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. Específicamente, en esta sección se introducen los principales factores que fundamentan el diseño y la implementación del modelo, el cual considera tanto las condiciones ambientales como las prácticas sostenibles en la agricultura de este sistema productivo.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el cultivo de arroz, en particular cuando se emplean sistemas de riego, demanda una cantidad significativa de recursos hídricos. Sin embargo, el VCAM se caracteriza por tener largos períodos de sequía y variabilidad climática creciente, lo cual impacta directamente los rendimientos del arroz y la estabilidad económica de los agricultores. Por esta razón, el modelo productivo enfatiza la importancia de optimizar los sistemas de riego mediante tecnologías avanzadas y prácticas de ahorro hídrico que maximicen la eficiencia y minimicen el desperdicio, aspectos claves para la sostenibilidad de la producción.



Con este propósito, el modelo sugiere que se incorporen tecnologías de precisión y realizar simulaciones en la programación del riego para adaptarlo a las necesidades de cada etapa del cultivo y a las condiciones climáticas locales. Este enfoque permite no solo optimizar el rendimiento del arroz, sino también reducir la huella hídrica, un factor crítico en una región con alta presión sobre los recursos hídricos y un ecosistema vulnerable a la variabilidad climática.

En segundo lugar, el enfoque agronómico del modelo hace recomendaciones específicas sobre el uso de variedades de arroz que se adapten a la fenología y al clima local, así como al manejo de los recursos suelo y agua. También aborda el manejo integrado de plagas y enfermedades con prácticas sostenibles que mejoren la calidad del cultivo y reduzcan el impacto ambiental que tiene el uso de productos químicos. Asimismo, para conservar la fertilidad del suelo, el modelo propone un sistema de rotación de cultivos y prácticas de manejo de nutrientes que permitan mantener un equilibrio sostenible en los recursos naturales.

Por último, respecto a la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social, el modelo reconoce el valor que tienen los servicios ecosistémicos generados por el cultivo de arroz en la región, los cuales incluyen la conservación de la biodiversidad y el soporte de actividades agrícolas complementarias que diversifican la economía local y proporcionan estabilidad económica a las comunidades rurales del VCAM.

En resumen, este modelo productivo para el cultivo de arroz en el VCAM ofrece un enfoque completo que integra la eficiencia en el uso de los recursos naturales, la resiliencia frente a la variabilidad climática y la mejora en la productividad, con lo cual contribuye a una agricultura más sostenible y competitiva en el contexto del VCAM.



1

Área geográfica, entorno ambiental y distritos de riego

Camilo Ignacio **Jaramillo-Barrios**
Sonia Mercedes **Polo-Murcia**
Carlos Alberto **Abaunza-González**
Sofiane **Ouazaa**
Nesrine **Chaali**

Introducción

En este capítulo el lector podrá explorar el contexto geográfico mundial, nacional y regional del VCAM, así como los distritos de riego presentes en la región. En primer lugar, se analizan los principales países productores de arroz, el consumo per cápita y su importancia para la seguridad alimentaria global. Respecto al ámbito nacional, se describe el área de siembra y la clasificación de los productores.

Posteriormente, se presenta el área geográfica del VCAM, las unidades productoras de arroz mecanizado, el área mensual sembrada y las áreas según tenencia de tierra y tipo de siembra. Para finalizar, se detalla la infraestructura de los distritos de riego del VCAM en Huila y Tolima, con especial atención a los de Usocoello y Ususaldaña, así como a la distribución de distritos de riego activos según tamaño y área neta beneficiada en la producción de arroz.

Área geográfica mundial

El arroz es el cultivo más importante para la seguridad alimentaria de aproximadamente la mitad de la población mundial —con lo cual supera la contribución de la mayoría de los cereales (Sarwar et al., 2022)—, cubre más del 21 % de las necesidades calóricas humanas e incluso llega al 76 % de la ingesta calórica en el sudeste asiático (Zhao et al., 2020).

El papel fundamental de este cultivo se evidencia en el aumento que tuvieron tanto la producción mundial de arroz *paddy* entre 1994 y 2022, como la superficie mundial, exceptuando el período de 1999 a 2002, cuando tuvo un gran descenso (figura 1.1).



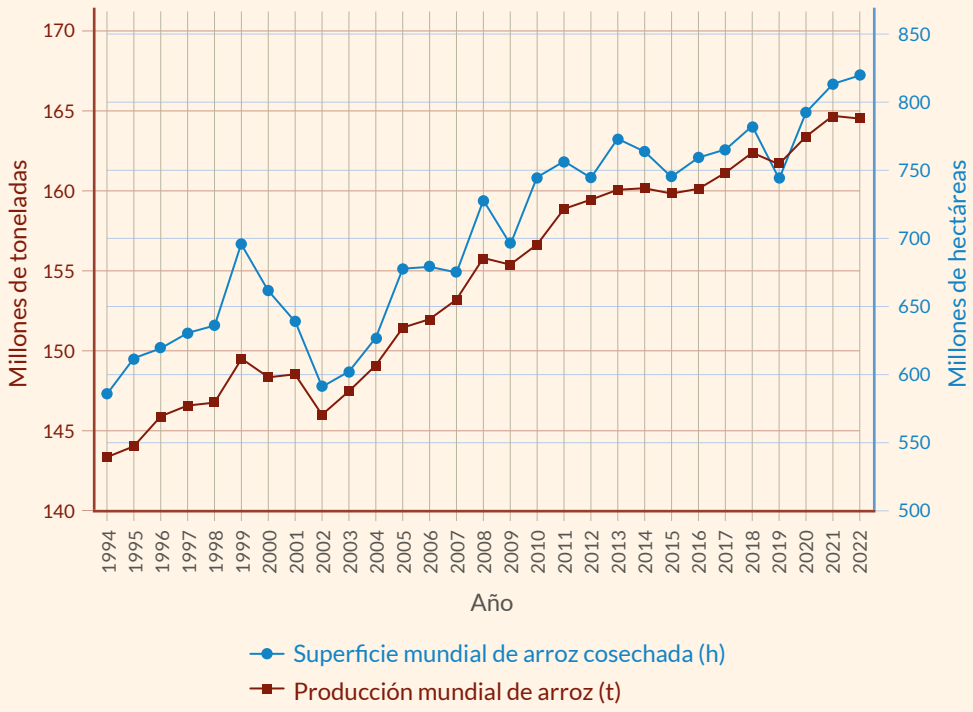


Figura 1.1. Cantidades de producción/rendimiento de arroz *paddy* en el mundo (1994-2022).

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT, 2024).

En cuanto a la distribución geográfica de la producción promedio mundial de arroz *paddy* entre 1994 y 2022, la figura 1.2 ilustra que Asia lidera con el 90,5 %, seguida por las Américas (5,1 %), África (3,8 %), Europa (0,5 %) y Oceanía (0,1 %) (FAOSTAT, 2024). Específicamente, en el año 2022 China encabezó la producción con 208,5 millones de toneladas (Mt), seguida por India (196,2 Mt), Bangladesh (57,2 Mt), Indonesia (54,7 Mt) y Vietnam (42,7 Mt) (FAOSTAT, 2024). Además de este panorama, cabe señalar que se proyecta un aumento del 58 % en la producción mundial de arroz, pues se espera que alcance 567 Mt en el año 2030 (Mohidem et al., 2022).

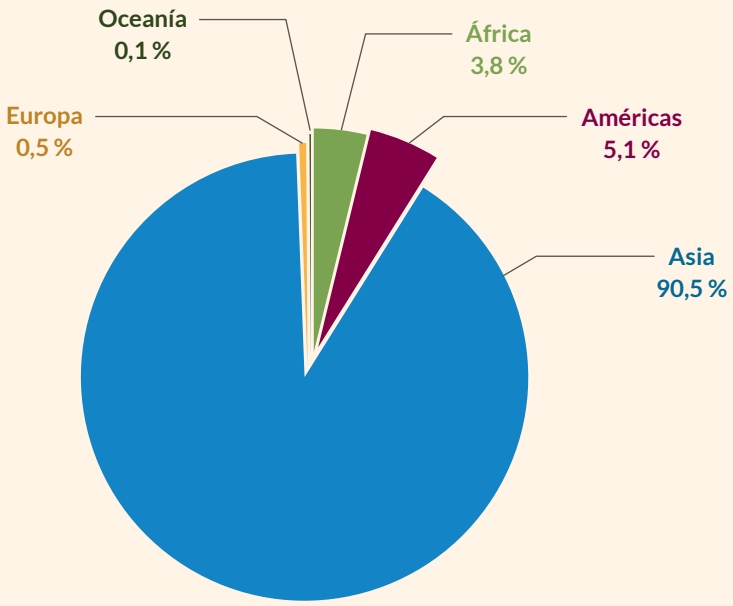


Figura 1.2. Participación en la producción de arroz por región (promedio 1994-2022).

Fuente: FAOSTAT (2024).

Según FAOSTAT (2024), el arroz es principalmente un alimento básico en Asia, el Caribe y América Latina, y se está popularizando de forma progresiva en África. En la década del 2014-2023 el consumo de arroz creció 0,78 % anual comparado con la proyección del 3,18 % al 2032. El consumo tiende a incrementar en África (1,3 % por año), Norteamérica (0,59 %) y Oceanía (0,37 %), al tiempo que disminuye en América Latina (-0,15 %). El consumo per cápita anual de arroz por persona en el 2023 fue de 73,75 kg en Asia, 27,37 kg en África y 25,30 kg en América Latina.

En Suramérica el arroz es uno de los principales cultivos, se considera un alimento básico y proporciona el 11,5 % de la ingesta calórica diaria, con un consumo promedio de 37 kg/persona/año. Además, es la principal fuente de

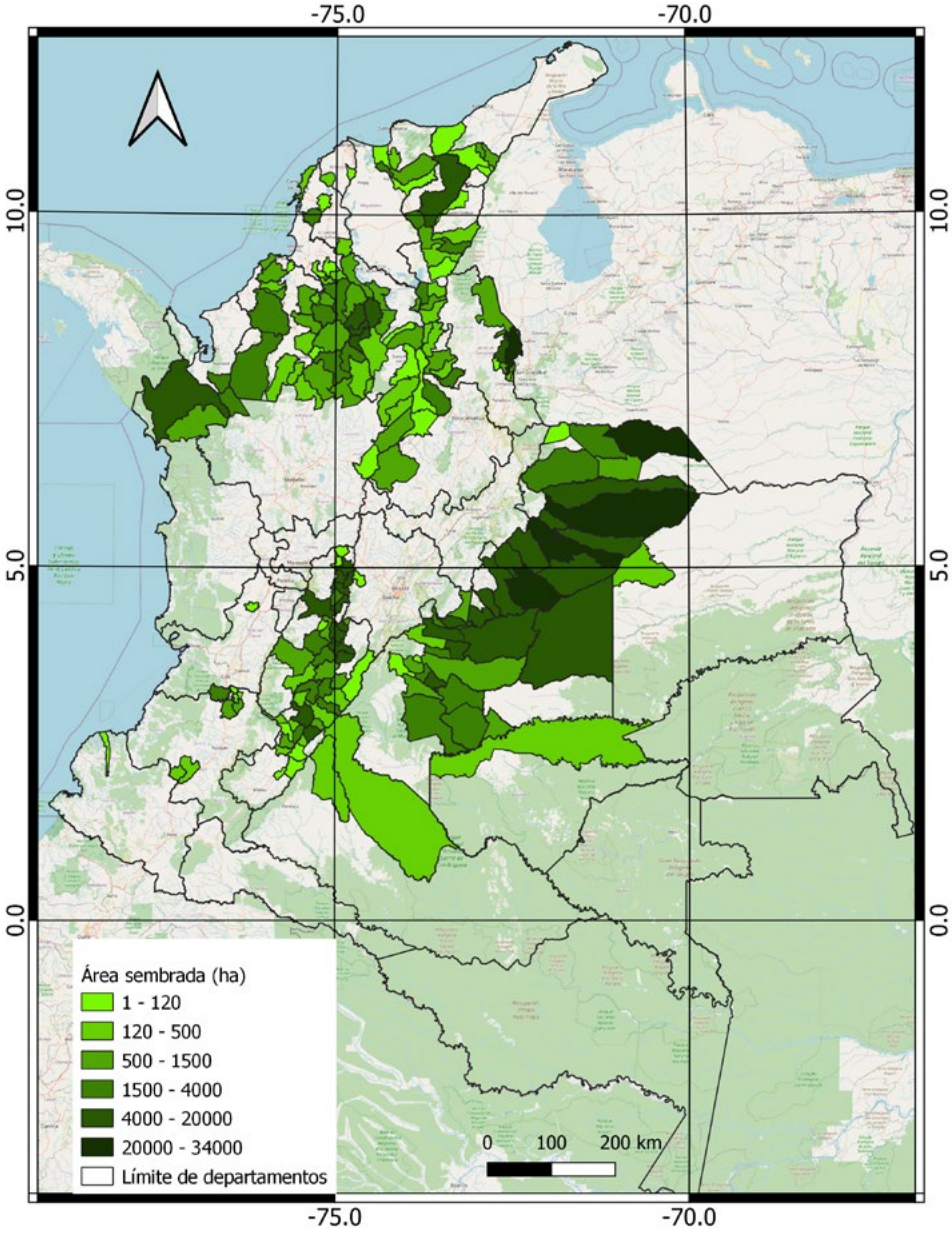
energía, empleo e ingresos para cerca de un millón de agricultores en la región (Maclean et al., 2013). En el caso específico de Colombia, se ha reportado un crecimiento de aproximadamente 25 % en la última década (2011-2021). Este comportamiento se debe a la combinación del aumento de la población y del consumo per cápita (11 %) (Durand-Morat & Bairagi, 2022), el cual se estimó en 37,4 kg anuales en 2021, lo cual representa el 11,2 % de la ingesta calórica media (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023).

Ahora bien, teniendo en cuenta que la población mundial alcanzó los 8.000 millones en 2022 y que se prevé que crezca hasta los 9.700 millones en 2050 (United Nations, 2022), es imperativo mejorar la eficiencia en el uso de los recursos productivos para maximizar la producción agrícola, especialmente en el caso del arroz y su gran huella hídrica (Phillips et al., 2024).

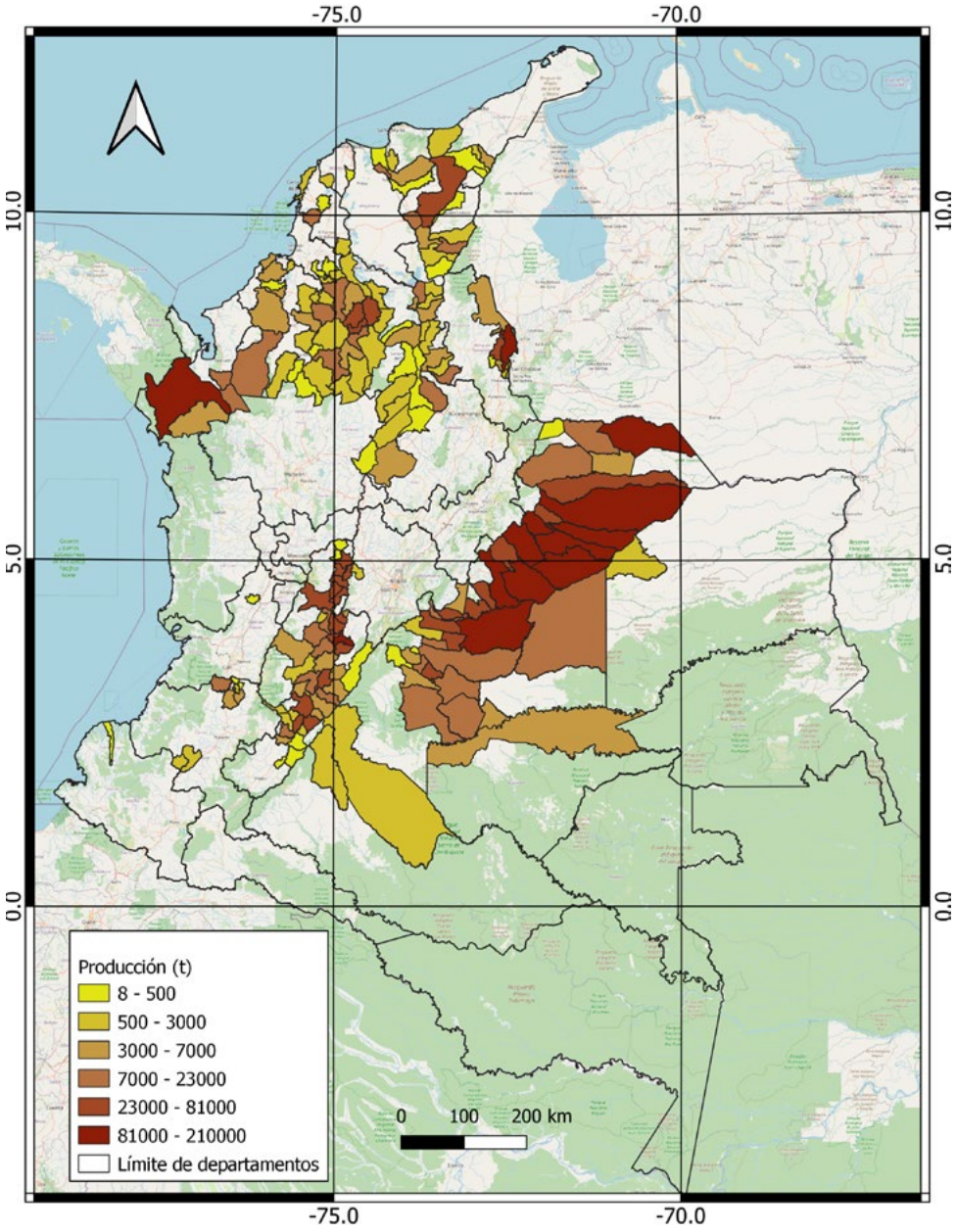
El arroz riego demanda un uso intensivo de agua, a tal punto que representa aproximadamente el 25 % del consumo anual de agua dulce en el mundo (Dobermann, 2012) y entre el 34 % y el 43 % del uso global de agua destinada al riego (Surendran et al., 2021). Debido a este gran consumo hídrico y a que dos tercios de la población mundial enfrentan actualmente escasez hídrica (Mekonnen & Hoekstra, 2016), es cada vez más importante que todo el arroz producido se destine al consumo humano y no a otros usos alternativos que puedan surgir cuando se considera que es de baja calidad.

Área geográfica nacional

En Colombia, el cultivo de arroz se desarrolla en 211 municipios de 23 departamentos y ocupa el tercer lugar en términos de área sembrada, después del café y el maíz (figura 1.3). En promedio, la producción de arroz en el país corresponde a medianos productores (10 a 50 ha), pero las regiones de la zona Centro, Bajo Cauca y Santanderes están más caracterizadas por pequeños productores (menos de 10 ha), mientras que los grandes productores (más de 50 ha) se concentran en la zona de los Llanos (Becerra et al., 2020).


-75.0
-70.0
10.0
5.0
0.0
Área sembrada (ha)
1 - 120
120 - 500
500 - 1500
1500 - 4000
4000 - 20000
20000 - 34000
Límite de departamentos
0
100
200 km

a



b

Figura 1.3. Distribución geográfica del cultivo de arroz mecanizado en Colombia por municipio en el año 2023. **a.** Área sembrada; **b.** Producción.

Fuente: EVA-UPRA (2022).

Específicamente, la región del VCAM está localizada entre las cordilleras Oriental y Central —con mayor extensión en los departamentos del Huila y Tolima—, entre las coordenadas mínimas de 1° 48' 45.5" N, 76° 0' 55.41" W de latitud norte y máximas de 5° 19' 9.65" N, 74° 28' 49.91" W de longitud oeste, y comprende un área aproximada de 1'525.906 ha (figura 1.4). El VCAM está conformado por zonas de clima cálido y húmedo, con altitud menor a 1.000 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) y precipitaciones entre 2.000 mm y 3.000 mm anuales, y zonas de clima cálido y seco con altitud menor de 1.000 m s. n. m. y lluvias de 1.000 mm anuales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1994, 2004).

De acuerdo con el Quinto Censo Nacional Arrocero (DANE & Fedearroz, 2023), Huila y Tolima tienen características distintivas en la producción de arroz mecanizado en comparación con los datos nacionales. Mientras que en el país se registran 13.102 productores de arroz, de los cuales 6.430 utilizan sistemas de riego, y hay un total de 25.084 unidades productoras agropecuarias (UPA), Huila tiene 1.178 productores, todos con sistemas de riego, y 2.526 UPA. Como se observa, aunque este departamento aporta una fracción menor del total nacional, la adopción completa de sistemas de riego en la región refleja un enfoque concentrado en técnicas avanzadas, a pesar de su menor participación en el total de UPA (tabla 1.1).



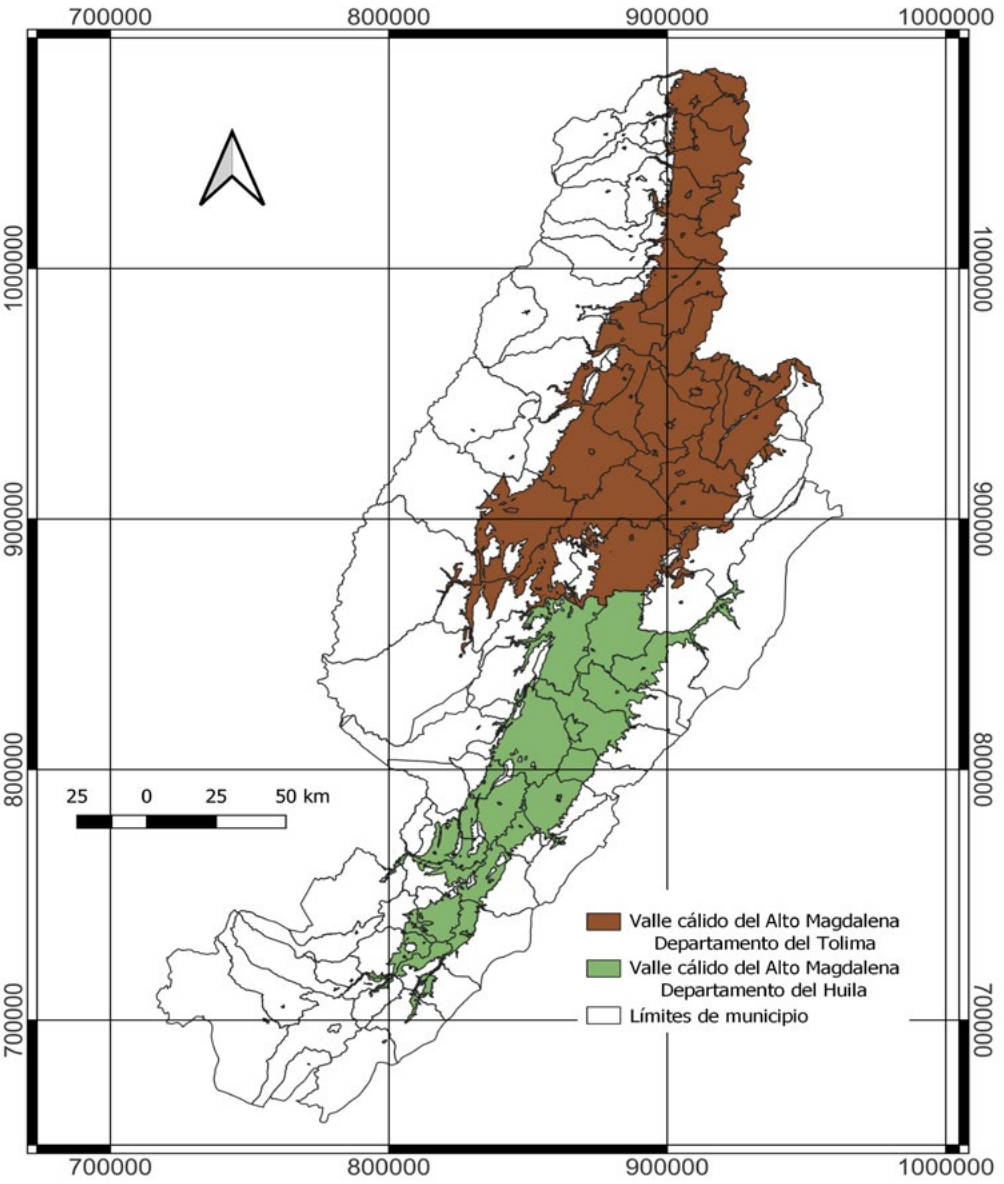


Figura 1.4. Localización geográfica del VCAM en los departamentos de Tolima y Huila.

Fuente: Elaboración propia con base en IGAC (1994, 2004).

Tabla 1.1. Productores y Unidades Productoras (UPA) de arroz mecanizado en 2023

Variable	Nacional	Zona Centro	Huila	Tolima
Productores				
Total	13.102	3.695	1.178	2.296
Sistema de riego	6.430	3.672	1.178	2.296
Semestre I	10.754	3.365	1.073	2.082
Semestre II	12.709	3.560	1.108	2.235
UPA*				
Total	25.084	10.394	2.526	7.491
Sistema de riego	14.811	10.354	2.526	7.491
Semestre I	20.583	8.880	2.164	6.375
Semestre II	23.920	9.823	2.267	7.190

* UPA: Unidad de Producción Agropecuaria.

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE y Fedearroz (2023).

Por su parte, Tolima tiene 2.296 productores y 7.491 UPA, todos los cuales emplean sistemas de riego. Comparado con los datos nacionales, Tolima tiene una participación significativa en cuanto a productores y UPA, de manera que se destaca por su mayor densidad y expansión en la producción de arroz. Además, a diferencia de Huila, Tolima tiene un impacto más pronunciado en el panorama nacional del arroz mecanizado, lo cual evidencia una capacidad productiva destacada que contribuye de forma sustancial al total nacional. Las diferencias en la escala y en el uso de riego entre Huila y Tolima subrayan las diversas dinámicas regionales dentro del sector arrocero colombiano (DANE & Fedearroz, 2023).

Ahora bien, en cuanto al promedio del área de la finca sembrada con arroz mecanizado en Colombia, el Quinto Censo Nacional Arrocero (DANE & Fedearroz, 2023) indica que es de 23 ha en el primer semestre y de 11 ha en el segundo. Comparativamente, Huila muestra un promedio de 10 ha en el primer semestre y de 9 ha en el segundo, mientras que Tolima presenta 11 ha en el primero y 10 ha en el segundo. Estas cifras indican que la extensión de las áreas sembradas en las fincas de Huila y Tolima es menor en comparación con el promedio nacional, con una ligera disminución en el segundo semestre.

En cuanto a la proporción del área de la finca sembrada con arroz mecanizado, Huila destaca con el 38 % en el primer semestre y el 40 % en el segundo, frente al promedio nacional del 19 % en el primero y el 18 % en el segundo. Tolima también muestra proporciones elevadas, con 31 % y 32 %, respectivamente. Además, el área sembrada con sistema de riego en Huila fue de 16.817 ha en el primer semestre y de 18.139 ha en el segundo, mientras que Tolima sembró 50.695 ha y 49.893 ha, respectivamente. La producción también presenta una tendencia similar: Huila produce 138.817 t en el primer semestre y 114.061 t en el segundo, mientras que Tolima alcanza 335.796 t y 349.780 t, respectivamente (tabla 1.2). Aunque los rendimientos en ambas regiones son comparables con el promedio nacional en el primer semestre, Tolima y Huila muestran rendimientos algo menores en el segundo semestre. Estos datos sugieren que mientras Huila y Tolima tienen un papel importante en la producción nacional, las condiciones y prácticas agrícolas varían entre las regiones (DANE & Fedearroz, 2023).

Tabla 1.2. Área, producción y rendimiento de arroz mecanizado en el VCAM en 2023

Variable	Nacional	Zona Centro	Huila	Tolima
Promedio del área de la finca (ha)				
Semestre I	114		34	25
Semestre II	61		30	23
Promedio del área de la finca sembrada con arroz mecanizado (ha)				
Semestre I	23		11	10
Semestre II	11		10	9
Proporción de área de la finca sembrada con arroz mecanizado (%)				
Semestre I	19		31	38
Semestre II	18		32	40

Continúa

Continuación

Variable	Nacional	Zona Centro	Huila	Tolima
Área sembrada con sistema de producción con riego (ha)				
Semestre I	126.740	70.698	16.817	50.695
Semestre II	127.578	70.945	18.139	49.893
Área cosechada (ha)				
Semestre I	143.116	66.646	19.025	45.329
Semestre II	425.339	69.046	15.506	48.255
Producción (t)				
Semestre I	914.779	490.269	138.817	335.796
Semestre II	2'273.487	494.563	114.061	349.780
Rendimiento (t/ha)				
Semestre I	6,4	7,4	7,3	7,4
Semestre II	5,3	7,2	7,4	7,2

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE y Fedearroz (2023).

En Tolima los picos máximos de área sembrada se registran en marzo y septiembre, con aproximadamente 10.500 ha y 12.500 ha, respectivamente. En contraste, los mínimos se observan en julio y agosto, con cerca de 3.000 ha (figura 1.5). La tendencia general en Tolima indica incrementos en la siembra durante los primeros meses del año y nuevamente a partir de agosto, con reducciones en los meses intermedios.



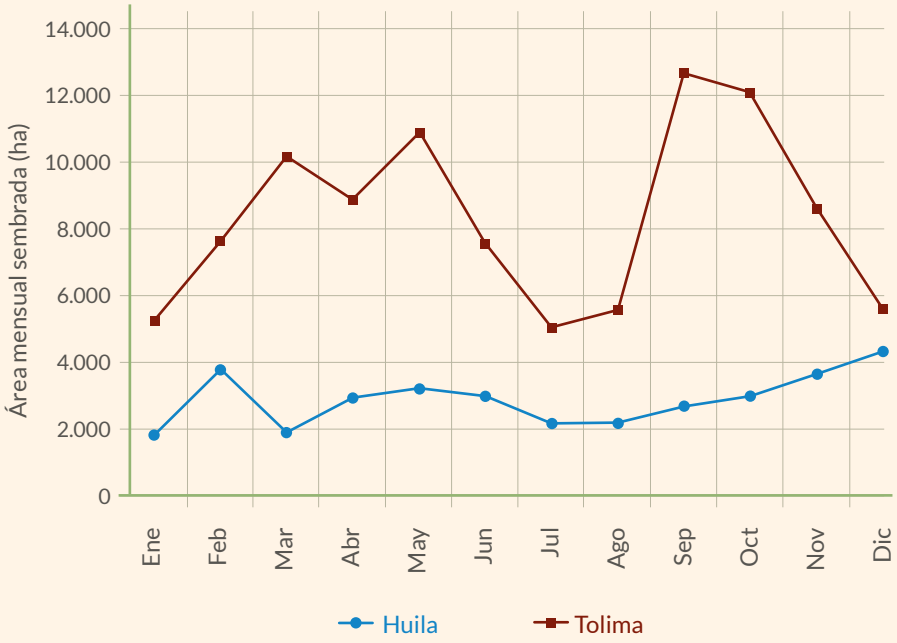


Figura 1.5. Área mensual sembrada con arroz mecanizado en el VCAM (Huila-Tolima).

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE y Fedearroz (2023).

En Huila, la variación mensual es menor y el área sembrada es más constante a lo largo del año, pues oscila entre 2.000 ha y 4.000 ha (figura 1.5). Los picos se registran en febrero y diciembre, con áreas cercanas a las 4.000 ha. De septiembre a diciembre, se observa un aumento gradual en el área sembrada, lo cual indica que hay una estabilidad en la producción en comparación con Tolima. Estas diferencias destacan las dinámicas de producción de arroz mecanizado en ambos departamentos.

Como se aprecia en la figura 1.6, durante el primer semestre de 2023 se registraron 72.820 ha sembradas, entre las cuales predominaron las de surco: el 31,6 % del área (23.046 ha) fue bajo propiedad y el 34,3 % (24.989 ha) bajo arrendamiento. Este método se destaca por su capacidad para incrementar la

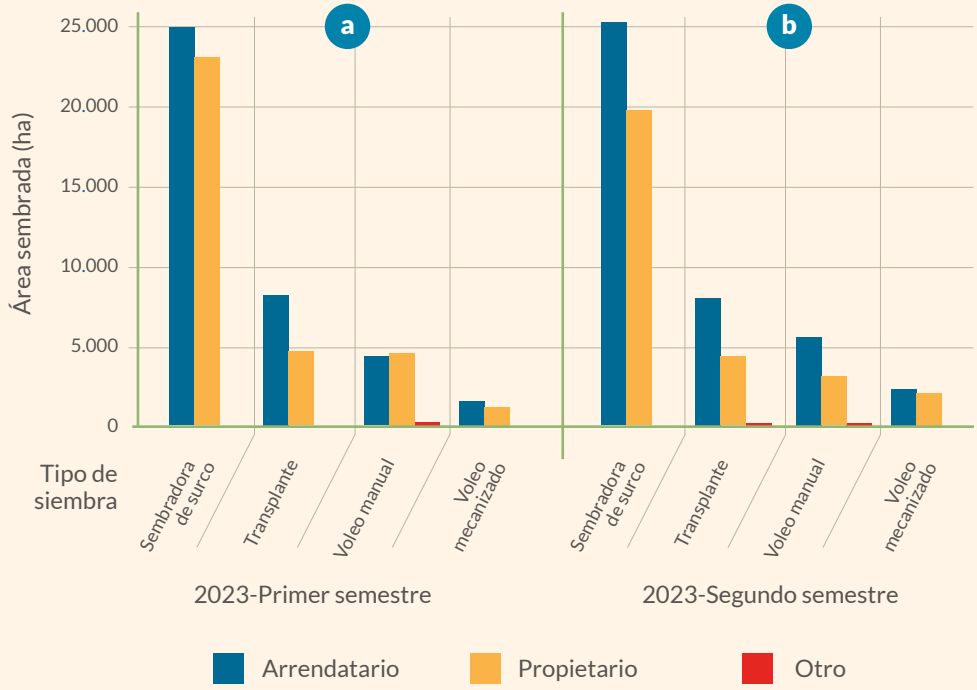


Figura 1.6. Área sembrada con arroz mecanizado según tenencia de tierra y tipo de siembra. a. Primer semestre; b. Segundo semestre.

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE y Fedearroz (2023).

eficiencia en el uso del agua y optimizar la gestión del cultivo, aspectos cruciales en zonas propensas a variabilidades climáticas y con limitaciones hídricas.

Para el segundo semestre del 2023, aunque el número de las UPA aumentó a 7.617, la superficie sembrada se redujo a 71.239 hectáreas, lo cual refleja una densificación de la práctica de siembra y una posible respuesta a las condiciones climáticas adversas o a políticas de uso eficiente del agua. De manera notable, los arrendatarios incrementaron su aplicación de la técnica de trasplante, que representó el 11,4 % del total sembrado (8.093 ha), cifra indicativa de que hubo un ajuste en las estrategias de siembra para mejorar la adaptabilidad y la sostenibilidad de la producción arrocera en esta región agrícolamente vital.

Distritos de riego del VCAM

Infraestructura de riego en el departamento de Huila

En el departamento del Huila, la superficie total con algún tipo de infraestructura para riego abarca 17.846 ha, de las cuales 8.441 ha están en distritos activos que benefician principalmente al cultivo de arroz y otros cultivos, los cuales representan el 47 % del área con riego en el departamento (Agencia de Desarrollo Rural [ADR], 2024). El 10 % de los distritos de riego y drenaje en el departamento no están operativos y muchos de los que operan requieren rehabilitación urgente. La región depende significativamente de estos distritos de riego para mantener su producción agrícola, especialmente en cultivos como el arroz, que es dominante en municipios como Campoalegre y Palermo. En cuanto a la situación en la región, 15 distritos abarcan 6.466 ha de mediana escala y 1.975 ha de pequeña escala, con una preponderancia de distritos pequeños (n = 11) y medianos (n = 4). Estos distritos se clasificaron, de acuerdo con el artículo 31 de la Resolución 1399 de 2005 del Incoder, en tres escalas según su tamaño: pequeña escala, entre 30 y 500 ha; mediana escala, entre 501 y 5.000 ha; y gran escala, mayor a 5.000 ha.

El arroz es el cultivo principal en varios municipios del Huila, lo cual refleja la alta dependencia de los sistemas de riego en esta región. Por ejemplo, en Campoalegre, 2.417 ha de arroz se riegan en distritos de mediana escala, mientras que 118 ha tienen riego en distritos de pequeña escala, con lo cual el municipio suma un total de 2.535 ha. En Palermo, se destacan 2.600 ha dedicadas exclusivamente al arroz en distritos de mediana escala. Otros municipios, como Villavieja y Yaguará, muestran una diversificación con cultivos adicionales como maíz, sorgo y frutales, con áreas con riego que suman 2.099 ha y 540 ha, respectivamente.

Aunque la región presenta cierta diversificación agrícola, el arroz sigue siendo el cultivo dominante, lo cual subraya la importancia que tiene la eficiencia en el uso del agua y la necesidad de mantener una infraestructura de riego robusta. Al respecto, la figura 1.7 muestra una comparación entre la eficiencia en el uso del agua y la presión hídrica sobre los ecosistemas en diversas subzonas hidrográficas en el departamento del Huila. Específicamente, se observa que las subzonas de los ríos Cabrera y Timaná muestran un Índice de Eficiencia del Uso del Agua (IEUA)[1] relativamente alto (0,47 y 0,37, respectivamente) —lo cual indica un uso eficiente del agua—, mientras que otras, como la del río Páez, exhiben una eficiencia baja (0,10) —lo cual sugiere la necesidad de mejoras en las prácticas de manejo del agua— (Gobernación del Huila & Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2022).

Esta disparidad, junto con la infraestructura deteriorada y los altos costos de rehabilitación (entre 11,5 y 18,6 millones de pesos por hectárea), afecta la sostenibilidad de la producción agrícola en la región. En municipios como Aipe y Tesalia, donde el arroz depende completamente de pequeños distritos de riego, la falta de modernización podría comprometer la producción y reducir la rentabilidad de los agricultores.

Por otro lado, el Índice de Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE)[2] revela una presión hídrica alta en varias subzonas, como las del río Timaná y los ríos directos al Magdalena, con valores de 0,92. Esto subraya la necesidad urgente de implementar medidas que equilibren la demanda agrícola con la conservación de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, este análisis pone de manifiesto la urgencia de adoptar estrategias de gestión integrada del recurso hídrico para garantizar la sostenibilidad en la región.

1 El IEUA mide la eficiencia con la que se utiliza el recurso hídrico en las diferentes subzonas hidrográficas. Un valor más alto indica un uso más eficiente del agua.

2 El IPHE representa la presión ejercida sobre los ecosistemas acuáticos debido al uso del agua por actividades humanas. Un valor más alto refleja una mayor presión y riesgo de degradación del ecosistema.

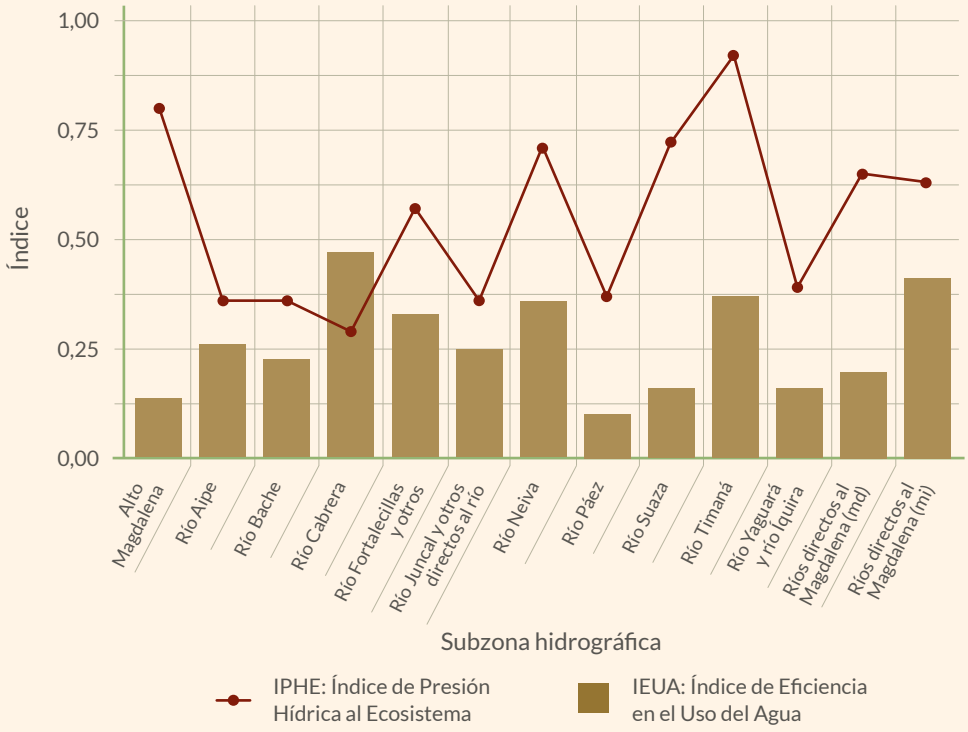


Figura 1.7. Índices de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA) y Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE) por subzona hidrográfica en el departamento del Huila.

Notas: IEUA: Un valor más alto indica un uso más eficiente del agua. IPHE: Un valor más alto refleja una mayor presión y riesgo de degradación del ecosistema.

Fuente: Elaboración propia con base en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019).

Los sistemas de riego actuales en el Huila, especialmente aquellos que dependen del bombeo, enfrentan costos operativos elevados debido a su baja eficiencia energética. Esto repercute directamente en el costo del agua y, por lo tanto, disminuye la rentabilidad del cultivo de arroz, que es el principal cultivo en muchos de los distritos. En municipios como Campoalegre y Palermo, donde se concentran grandes áreas dedicadas al arroz, la modernización de los sistemas de riego podría reducir significativamente estos costos y mejorar la competitividad del arroz en el mercado nacional e internacional.

Infraestructura de riego en el departamento del Tolima

Los distritos de riego Usocoello y Ususaldaña (figura 1.8) son los más representativos en cuanto a la producción de arroz en el Tolima. Cabe señalar que desde cuando el Estado entregó la infraestructura de adecuación de tierras, estos distritos son manejados por asociaciones de usuarios como empresas privadas, de manera que derivan sus ingresos principalmente de la tarifa volumétrica de agua.

Tolima tiene una superficie irrigada de 60.471 ha, de las cuales 54.485 ha son distritos de riego activos, dedicados principalmente al cultivo de arroz. Este valor representa el 90 % del área irrigada, lo cual subraya la importancia que tiene el arroz en la estructura agrícola del departamento y refleja una elevada eficiencia en el uso de las tierras con riego. Los distritos grandes, ubicados en Espinal y Saldaña, se orientan a la producción intensiva de arroz y evidencian un enfoque industrializado y masivo. Además, municipios como Guamo y Lérida, con distritos de riego medianos y pequeños, también priorizan el cultivo de arroz, lo cual reafirma su relevancia en la región. Esta configuración de riego, que combina grandes y pequeños distritos, indica un equilibrio entre eficiencia y accesibilidad en la producción arrocera en el Tolima.

Distrito de riego Usocoello

El distrito de riego Usocoello, localizado en los municipios de Flandes, El Espinal y Guamo, está enmarcado por los ríos Coello, Magdalena y Luisa, así como por la quebrada Guaduas y el servicio de infraestructura de captación y conducción del río Cucuana (figura 1.9). Con una extensión total de 63.200 ha, de las cuales 45.496 ha son irrigadas anualmente, el área dotada de infraestructura para riego es de 25.600 ha, que está a cargo de 1.800 usuarios. Además, esta área está servida por una red de 388 km de canales y un sistema de drenaje constituido por varios cursos naturales (quebradas). Su altura promedio sobre el nivel del mar es de 300 m s. n. m.

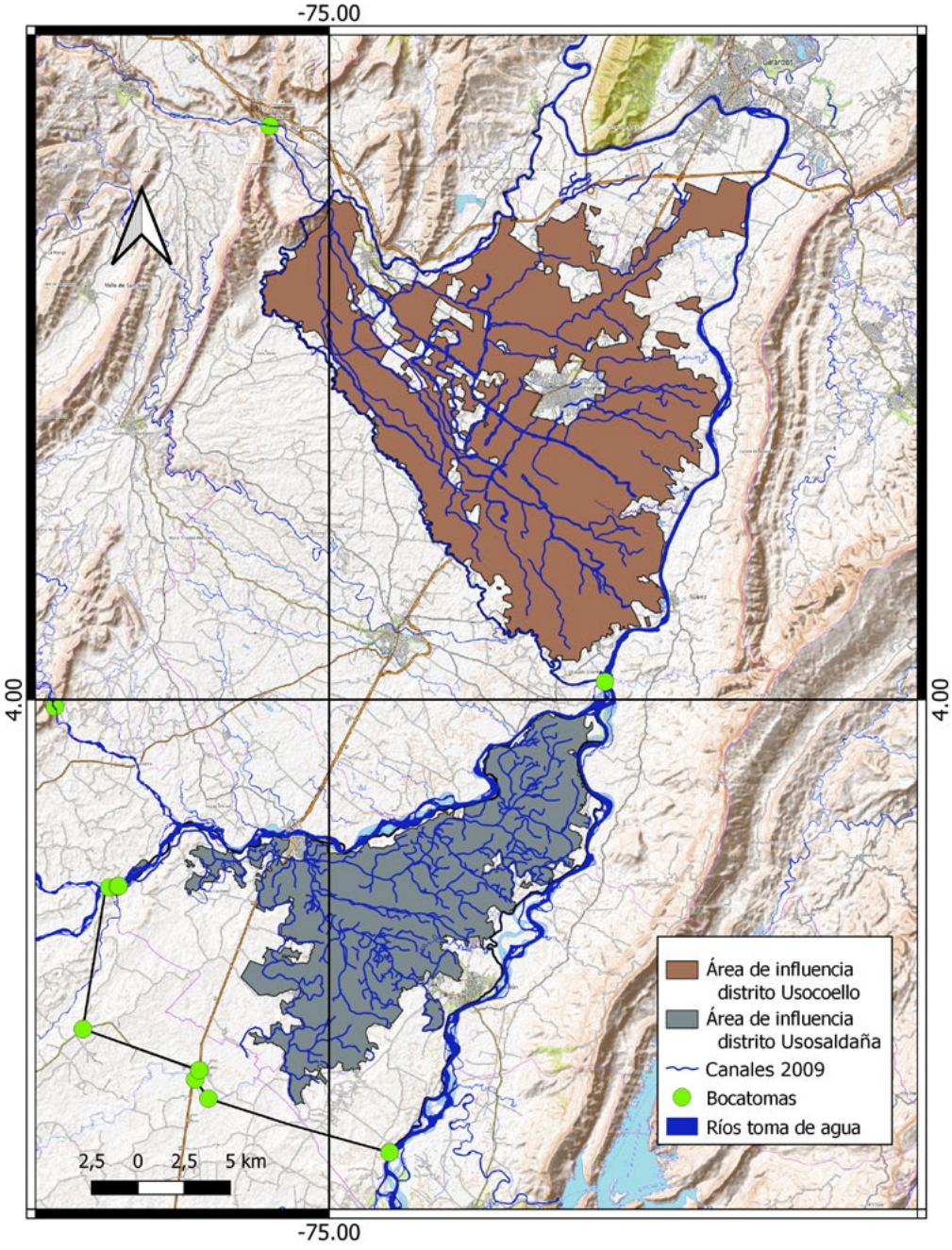


Figura 1.8. Distritos de riego Usocoello y Ususaldaña.

Fuente: Elaboración propia a partir de https://www.usocoello.com/historia/.

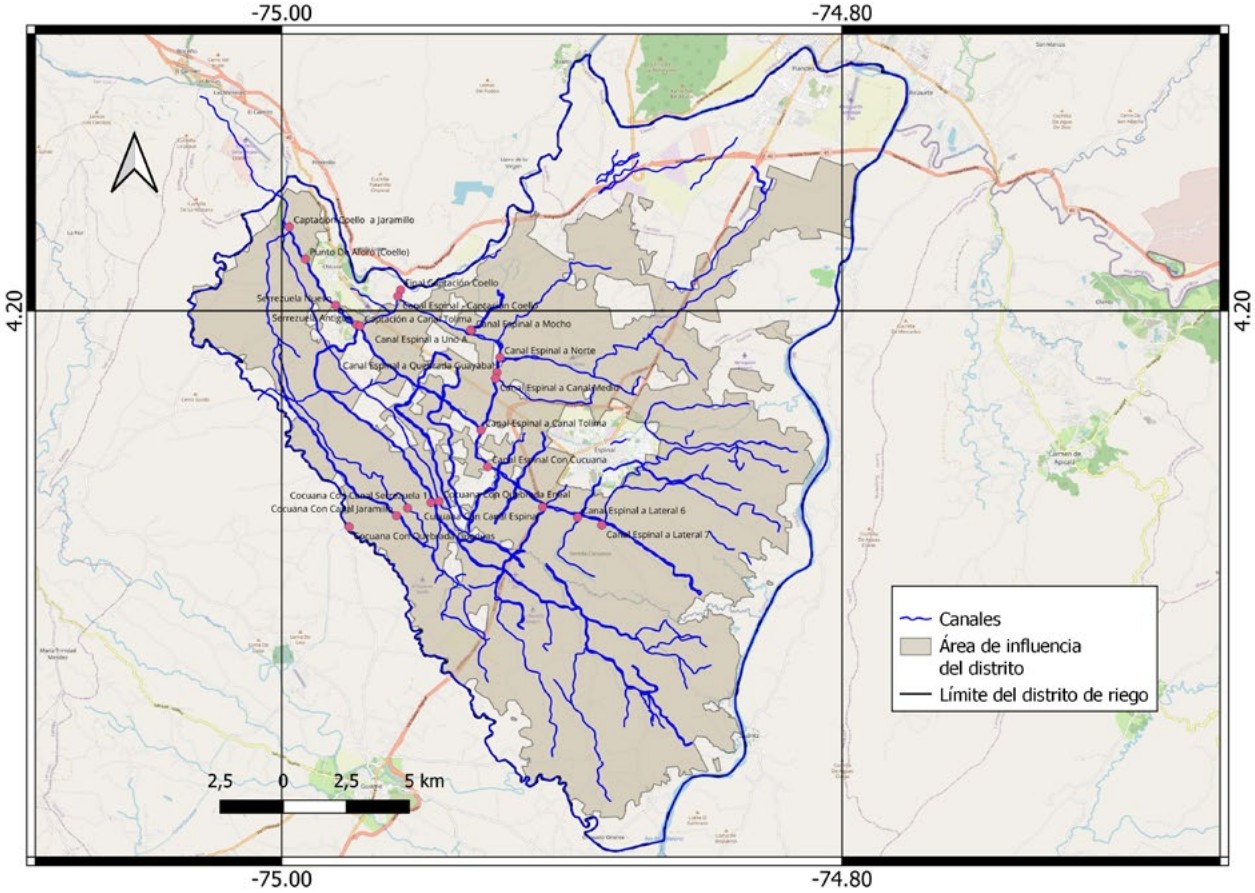


Figura 1.9. Localización del distrito de riego Usocoello.

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de https://www.usocoello.com/historia/.

El sistema depende principalmente de los ríos Coello y Cucuana, con una concesión total de 20,55 m^3/s, lo cual posibilita el uso de 648,06 millones de metros cúbicos de agua al año. Específicamente, el río Coello aporta 9,64 m^3/s (47 %), mientras que el río Cucuana contribuye con 10.91 m^3/s (53 %) (Bennett, 2016).

El arroz, principal cultivo en Usocoello, consume 360,9 millones de m^3 de agua anualmente, lo cual evidencia su alta demanda hídrica. Otros cultivos como maíz, algodón, frutales y sorgo necesitan en conjunto 52,9 millones de m^3 (Bennett, 2016). La eficiencia del riego en el cultivo de arroz es una preocupación constante, pues requiere 14.361 m^3/ha, en comparación con los 3.151 m^3/ha necesarios para otros cultivos. Esta disparidad sugiere un potencial de mejora significativa en la eficiencia del riego para garantizar la sostenibilidad del sistema (Bennett, 2016).

El distrito de riego Usocoello en la región depende en gran medida del agua para la producción agrícola, que genera empleo temporal para jornaleros contratados por día o por hora. Se estima que por cada hora de trabajo agrícola en el distrito se consumen aproximadamente 17.670 litros de agua, una cifra considerablemente mayor que la registrada en el sector minero local, donde el consumo es de unos 1.126 litros por hora de trabajo (Bennett, 2016). Esta alta dependencia hídrica implica que cualquier reducción en la disponibilidad de agua podría afectar negativamente tanto la producción como los ingresos de las familias vinculadas al sector. La concentración en un cultivo intensivo en agua incrementa la vulnerabilidad del distrito frente a escenarios de variabilidad climática y restricciones en el acceso al recurso. Además, el acceso al agua para cada agricultor está sujeto a un turno o ventana de distribución, determinada por la disponibilidad del recurso, la capacidad de conducción y el número de usuarios. Esta condición temporal influye directamente en la estrategia de manejo del riego en campo.

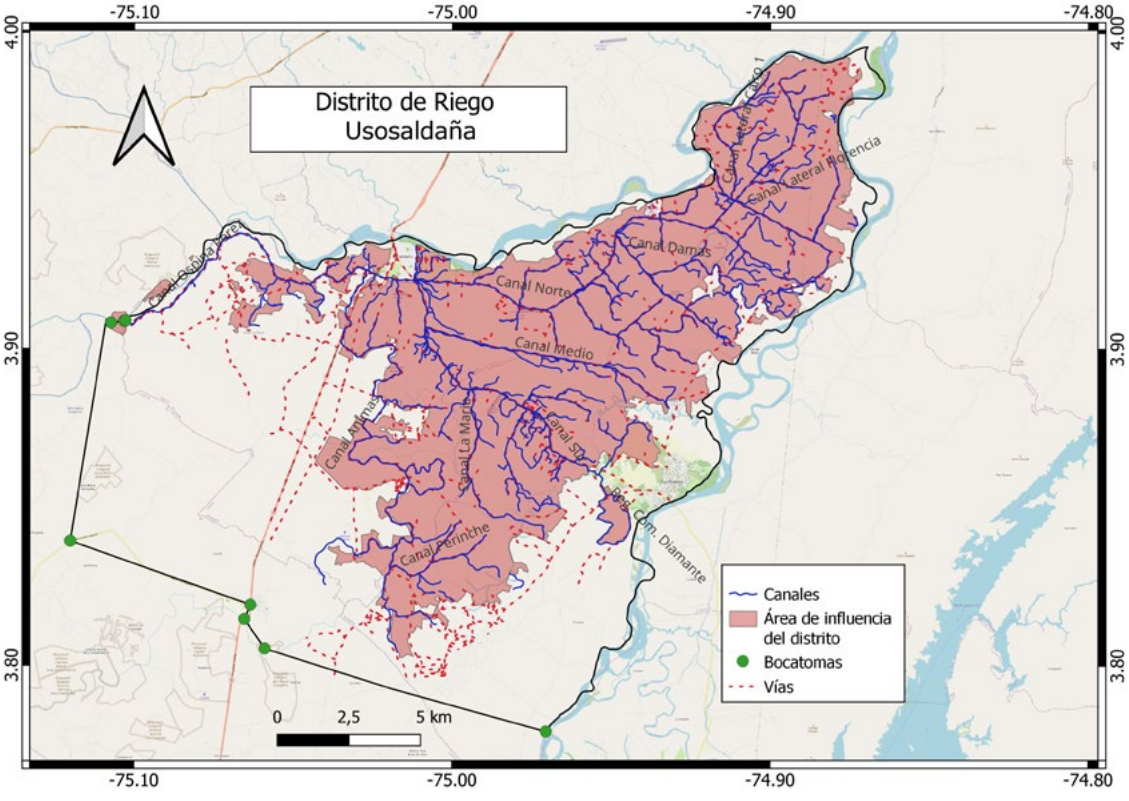
Frente a los desafíos que enfrenta el distrito de riego Usocoello, la modernización de su infraestructura y la diversificación hacia cultivos menos intensivos en el uso del agua se presentan como estrategias esenciales para mejorar la sostenibilidad del sistema. La infraestructura actual, aunque funcional, muestra signos de envejecimiento y obsolescencia tecnológica, lo cual reduce la

eficiencia del riego y aumenta las pérdidas de agua. El sistema de riego predominante en Usocoello se basa en técnicas tradicionales que no optimizan el uso del recurso hídrico, particularmente en el cultivo de arroz, que es el mayor consumidor de agua. La modernización de la infraestructura podría incluir la implementación de sistemas de riego por goteo o aspersión, en lugar de los métodos por inundación actualmente utilizados, lo cual reduciría significativamente el consumo de agua. Adicionalmente, la mejora de los canales de distribución y la introducción de tecnologías de monitoreo y control en tiempo real permitirían una gestión más precisa del recurso, pues se minimizarían las pérdidas por filtraciones y transpiración, al tiempo que se aseguraría que el agua llegue de manera más eficiente a los cultivos (Bennett, 2016).

Por otra parte, la diversificación hacia cultivos menos intensivos en agua, como el maíz, los frutales y el sorgo, no solo contribuiría a un uso más racional del recurso hídrico, sino que también ofrecería a los agricultores mayor resiliencia económica frente a fluctuaciones en los mercados y variabilidad climática. Estos cultivos requieren significativamente menos agua por hectárea en comparación con el arroz, lo cual liberaría una parte considerable del recurso hídrico para otros usos o para mantener la sostenibilidad del sistema en periodos de escasez. La introducción de estos cultivos podría ser acompañada de programas de capacitación para los agricultores, enfocados en prácticas de cultivo sostenibles y en el manejo eficiente del agua, lo que potenciaría aún más los beneficios de la diversificación. La adopción de estas medidas reduciría la presión sobre los recursos hídricos y permitiría una mejor adaptación del sistema de riego a las variaciones climáticas, de tal forma que protegería tanto la producción agrícola como los ecosistemas locales (Bennett, 2016).

Distrito de riego Ususaldaña

Localizado en los municipios de Saldaña, Purificación y Coyaima, sus límites están determinados por los ríos Magdalena y Saldaña (figura 1.10). El distrito tiene una extensión total de 36.500 ha, un área susceptible de riego de 25.000 ha y 2.752 predios inscritos.



Departamento del Tolima

Distrito Ususaldaña

Superficie (ha): 36.500

Susceptible de riego (ha): 25.000

Capacidad del canal Ospina Pérez (m^3/seg): 25

Longitud (km): 13

Canal	Longitud (m)
Ospina Pérez	13.123
Norte	18.933
Sur	10.139
Ánimas	18.848

Figura 1.10. Localización del distrito de riego Ususaldaña.

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de Ususaldaña (2017).

El agua se capta en el río Saldaña a través de dos bocatomas laterales en concreto, cada una con capacidad de 25 m^3/s. La conducción se realiza a través del canal Ospina Pérez y existen tres canales principales de distribución: Las Ánimas, Canal Norte y Canal Sur.

La Zona Hidrográfica de Saldaña (figura 1.11) demuestra un uso más eficiente del agua. Sin embargo, aunque el río Cucuana se destaca con un IEUA de 0,52, también registra un IPHE relativamente elevado de 0,56, lo cual sugiere que, pese a la eficiencia en el uso del agua, la presión sobre los ecosistemas acuáticos es considerable. Este patrón se repite en subzonas como Alto Saldaña y el río Tetuán, donde los IEUA son altos (0,49 y 0,46, respectivamente), pero los IPHE siguen siendo significativos (0,61 y 0,33, respectivamente), lo cual indica que las prácticas de manejo hídrico efectivas desde la perspectiva del rendimiento agrícola aún pueden generar impactos ecológicos adversos.

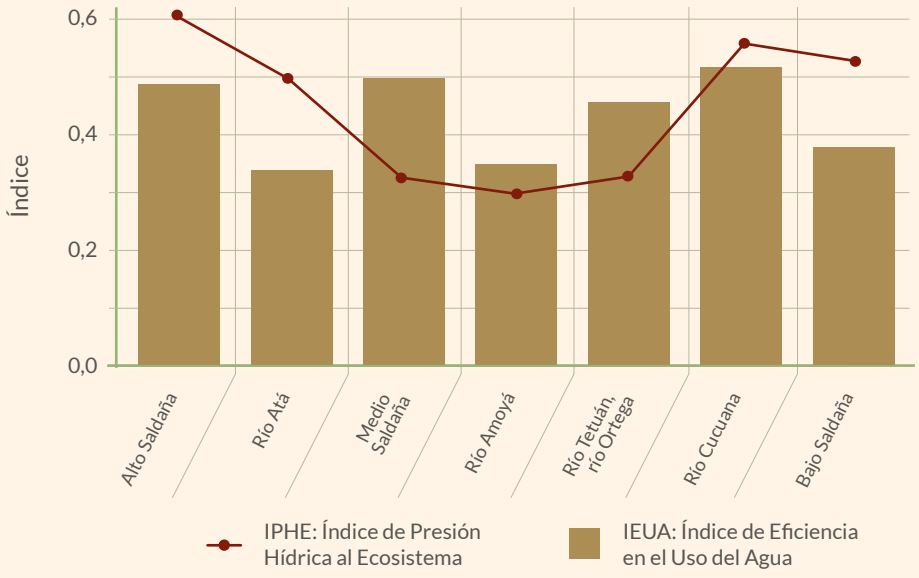


Figura 1.11. Índices de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA) y Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE) por subzona hidrográfica en el Departamento del Tolima: Zona Hidrográfica Saldaña.

Notas: IEUA: Un valor más alto indica un uso más eficiente del agua. IPHE: Un valor más alto refleja una mayor presión y riesgo de degradación del ecosistema.

Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM (2019).

Por otro lado, en la Zona Hidrográfica del Alto Magdalena (figura 1.12), específicamente en el río Coello, se observa un IEUA de 0,21, lo cual indica una moderada eficiencia en el uso del agua. No obstante, este río exhibe un IPHE de 0,52, es decir que hay una presión significativa sobre el ecosistema acuático, posiblemente atribuible a las intensas actividades agrícolas que prevalecen en esta subzona. En comparación, el río Prado, con un IEUA idéntico de 0,21, presenta un IPHE más bajo de 0,40, lo cual podría indicar una gestión más equilibrada o menor intensidad en el uso del recurso hídrico que resulta en una menor alteración ecológica.

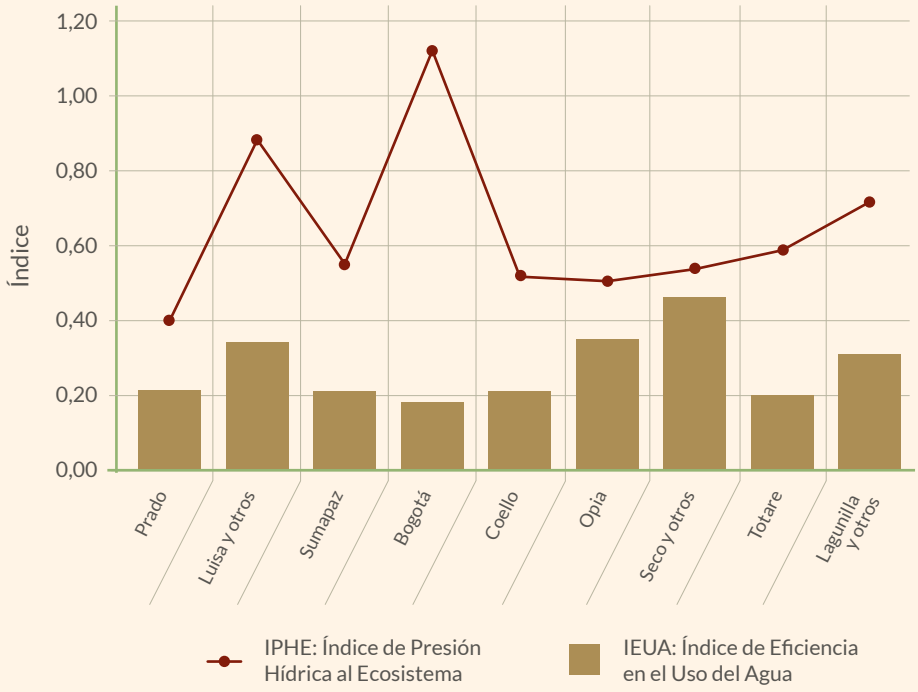


Figura 1.12. Índices de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA) y Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE) por subzona hidrográfica en el Departamento del Tolima: Zona Hidrográfica Alto Magdalena.

Notas: IEUA: Un valor más alto indica un uso más eficiente del agua. IPHE: Un valor más alto refleja una mayor presión y riesgo de degradación del ecosistema.

Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM (2019).

La tabla 1.3 muestra una comparación entre las regiones del VCAM en cuanto a la distribución de los distritos de riego por tamaño y el área neta beneficiada (ha) en la producción de arroz y otros cultivos. De acuerdo con la Agencia de Desarrollo Rural (ADR, s. f.), un distrito de riego es una infraestructura civil concebida para el uso colectivo, similar en naturaleza a obras como puentes, carreteras o edificios. Estas estructuras permiten captar agua de fuentes superficiales o subterráneas, la cual es conducida y distribuida a través de una red hacia los predios dedicados a actividades agropecuarias. Su función principal es reducir el riesgo de pérdidas por sequías o inundaciones, para garantizar una mayor estabilidad hídrica para la producción agrícola.

Tabla 1.3. Distribución de distritos de riego activos por tamaño y área neta beneficiada (ha) en la producción de arroz y otros cultivos en el VCAM

Región	Municipio	Cultivos	Grande (ha)	Mediano (ha)	Pequeño (ha)	Total (ha)	N.° de distritos	Distribución de distritos por tamaño
Huila				**6.466**	**1.975**	**8.441**	**N = 15**	**Mediano: n = 4; Pequeño: n = 11**
	Aipe	Arroz			60	60	n = 1	Pequeño: n = 1
	Altamira	Arroz y tabaco			357	357	n = 2	Pequeño: n = 2
	Campoalegre	Arroz		2.417	118	2.535	n = 3	Mediano: n = 2; Pequeño: n = 1
	Garzón	Frutales, arroz, ahuyama, limón, tabaco, maíz, ganado y maracuyá			70	70	n = 1	Pequeño: n = 1
	Palermo	Arroz, sorgo, pastos, frutales, tabaco y soca		2.600		2.600	n = 1	Pequeño: n = 1
	Tesalia	Arroz			180	180	n = 1	Pequeño: n = 1
	Villavieja	Arroz, maíz, sorgo, frutales, pastos, ganado y tabaco		1.449	650	2.099	n = 4	Mediano: n = 1; Pequeño: n = 3
	Yaguará	Arroz, sorgo, frutales, ganadería, tabaco y pastos			540	540	n = 2	Pequeño: n = 1

Continúa

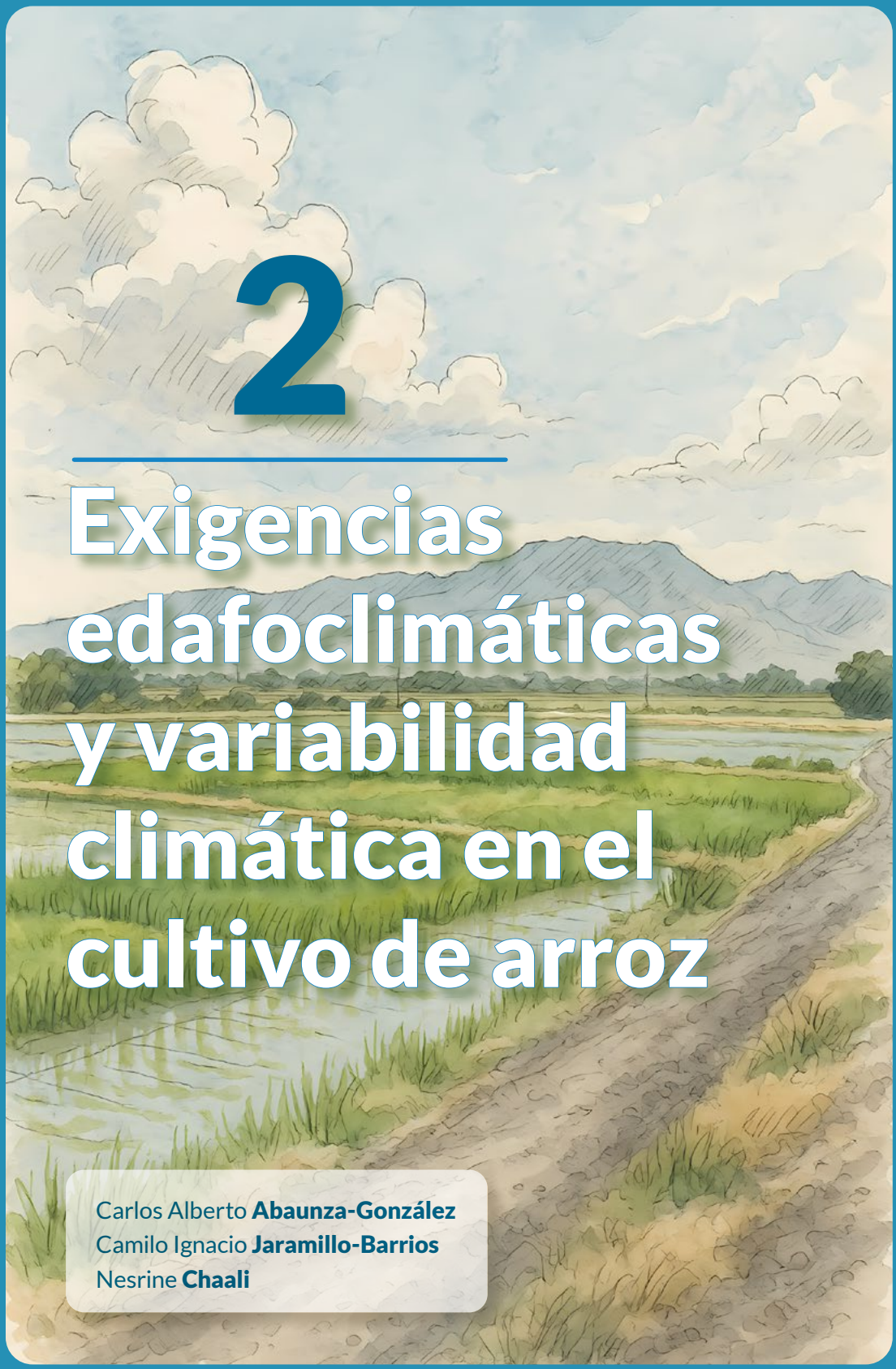
Continuación

Región	Municipio	Cultivos	Grande (ha)	Mediano (ha)	Pequeño (ha)	Total (ha)	N.° de distritos	Distribución de distritos por tamaño
Tolima			**49.267**	**4.244**	**974**	**54.485**	**N = 11**	**Grande: n = 3; Mediano: n = 2; Pequeño: n = 6**
	Chaparral	Arroz, maíz, sorgo, plátano, tomate y cacao			260	260		Pequeño: n = 2
	Coyaima	Algodón, maíz, sorgo y arroz			93	93		Pequeño: n = 1
	Espinal	Arroz, algodón, sorgo, soya y pastos	25.658			25.658		Grande: n = 1
	Guamo	Arroz		1.526		1.526		Mediano: n = 1
	Ibagué	Arroz			350	350		Pequeño: n = 1
	Lérida	Arroz, algodón, sorgo, soya, frutales y pastos	9.345		81	9.426		Grande: n = 1; Pequeño: n = 1
	Prado	Arroz, maíz y sorgo		2.718		2.718		Mediano: n = 1
	Saldaña	Arroz, frutales, algodón y sorgo	14.264			14.264		Grande: n = 1
	San Luis	Arroz, maíz, sorgo, yuca, cítricos y frutales			190	190		Pequeño: n = 1

Nota: De acuerdo con el artículo 31 de la Resolución 1399 de 2005 del Incoder, los distritos de riego se clasifican en tres escalas según su tamaño: pequeña escala, entre 30 y 500 ha; mediana escala, entre 501 y 5.000 ha; y gran escala, mayor a 5.000 ha. Esta clasificación no hace referencia a la distribución predial dentro del distrito, por lo que un distrito de gran escala podría beneficiar a gran cantidad de predios pequeños o viceversa.

Fuente: Elaboración propia con base en información de la ADR (2024).





2

Exigencias edafoclimáticas y variabilidad climática en el cultivo de arroz

Carlos Alberto **Abaunza-González**
Camilo Ignacio **Jaramillo-Barrios**
Nesrine **Chaali**

Introducción

En este capítulo se presentan los requerimientos del cultivo del arroz a partir de diferentes autores, haciendo énfasis en el sistema de arroz con riego del VCAM. Siguiendo una metodología de cruces sucesivos de mapas temáticos (altitud, precipitación, aspectos edáficos, entre otros), se presenta como resultado un mapa que zonifica las mejores condiciones para el cultivo de arroz con riego utilizando el sistema de inundación. En cuanto a la variabilidad climática, se abordan los impactos que tiene el cambio climático en el cultivo del arroz en Colombia y en el VCAM, específicamente en relación con las anomalías durante los fenómenos de El Niño y La Niña.

Exigencias edafoclimáticas

En este apartado se presentan las condiciones edafoclimáticas específicas para que el cultivo de arroz tenga un óptimo desarrollo y rendimiento. Se incluyen las variables altitud, fotoperíodo, radiación, temperatura, precipitación, humedad relativa y las características de los suelos, como profundidad, textura y drenaje.

Altitud

La mejor condición para el cultivo de arroz es sembrarlo en pisos térmicos entre 0 y 2.000 m s. n. m. (Benacchio, 1982) —o incluso por debajo, donde se cultiva con contenedores— hasta los 3.000 m s. n. m., como sucede en los Himalayas (Purseglove, 1985). Sin embargo, la altitud que ofrece mejores condiciones está en el rango de 800 a 1.000 m s. n. m. (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2013), pues a medida que aumenta la altura el ciclo se alarga (tabla 2.1).



Tabla 2.1. Escala de aptitud para el cultivo de arroz de riego respecto a la altitud

Variable	Mejores condiciones	Condición moderada	Condición marginal
Altitud (m s. n. m.)	800 a 1.000	200 a 800 y 1.000 a 1.300	< 200 y > 1300

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

Fotoperíodo y radiación

El fotoperíodo ideal para el cultivo del arroz en Colombia suele estar entre 12 y 14 horas de luz diaria. Sin embargo, en términos generales, la radiación solar promedio en zonas arroceras de Colombia puede oscilar entre 15 y 25 MJ/m² por día, lo cual equivale aproximadamente a entre 1.000 y 1.500 W/m².

Se considera que es una planta de día corto, con un fotoperíodo crítico de 12 a 14 horas. Aunque la sensibilidad al fotoperíodo cambia según las variedades, en las más sensibles el fotoperíodo crítico es de 10 horas. Además, casi todas las variedades presentan mayor precocidad en ambientes de días cortos (Baradas, 1994), pero existen algunas insensibles al fotoperíodo (Purseglove, 1985). En Colombia, las variedades existentes no son afectadas por el fotoperíodo (Barrios-Pérez, 2016).

El cultivo de arroz requiere radiación directa durante la mayor parte de su ciclo, con una intensidad de luz óptima entre 32,3 y 86,1 klux, equivalente a 255,17 - 680.19 W/m² (Baradas, 1994) (tabla 2.2). Los días nublados durante la etapa reproductiva y de maduración afectan significativamente el rendimiento. La etapa más crítica de la planta va de los 15 días antes de la floración hasta la cosecha, cuando se requieren más de 400 cal cm^{-2} $día^{-1}$, o lo que es igual, 193,5 W/m², para obtener altos rendimientos (Benacchio, 1982).

Tabla 2.2. Escala de aptitud para el cultivo de arroz respecto al fotoperíodo y la radiación

Variable	Mejores condiciones	Condición moderada	Condición marginal
Fotoperíodo (horas)	10 a 12	8 a 10	6 a 8
Radiación (kWh/m²)	7 a 5	4 a 5	< 4

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura

El rango donde se cultiva el arroz está entre 18 y 40 °C. Para la germinación se requieren de 18 a 40 °C, para la emergencia y establecimiento 25-30 °C, para el macollamiento 25-31 °C, para la floración 30-33 °C y para la maduración 20-29 °C (tabla 2.3) (Baradas, 1994).

Se debe tener en cuenta que las temperaturas elevadas eliminan las ganancias que pudieran tenerse en rendimiento derivadas de un incremento de CO_2 (Ainsworth, 2008).

Tabla 2.3. Escala de aptitud de la temperatura para el cultivo de arroz

Variable	Mejores condiciones	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Temperatura (°C)	25 a 30 °C	20 a 25 °C	15 y 20 °C Mayor a 42 °C

Fuente: Elaboración propia a partir de Barrios-Pérez (2016).

En cuanto al VCAM, las mayores temperaturas ocurren a lo largo de las riberas del río Magdalena. En el Tolima se producen en los sectores de Lérida, Espinal, Purificación, Coyaima y Natagaima, con valores medios superiores a los 28 °C, mientras que en el Huila se registran en áreas cercanas al municipio de Villavieja, al extremo norte del VCAM, con valores alrededor de 28 °C. En contraste, la

temperatura disminuye, especialmente, en la vertiente occidental de la cordillera Central. Por lo tanto, en términos generales el VCAM tiene un clima cálido árido y semiárido, característica presente en la mayor parte del valle del río Magdalena, en tanto que en el extremo sur es cálido semihúmedo y húmedo.

Precipitación

En toda su fase fenológica, el cultivo de arroz requiere 962 mm/año de lluvia (González et al., 2016). La sequía disminuye el rendimiento del grano porque se reduce la longitud y el peso de las panículas, el número de granos llenos por panícula y el peso de los granos, al tiempo que aumentan los granos vanos (Quispe et al., 1994). Cuando se cultiva en condiciones de temporal, requiere entre 1.000 y 4.000 mm/año, así como suelos húmedos e inundados. Específicamente, para buenos rendimientos se necesitan entre 200 y 300 mm/mes de lluvia bien distribuidos y la etapa más crítica ocurre en los 10 días anteriores a la floración (Benacchio, 1982).

En países donde las plantas alcanzan una altura promedio de 1 m, el coeficiente de cultivo (Kc) para las etapas inicial, intermedia y tardía es 1,05, 1,2 y 0,6-0,9, respectivamente (Allen et al., 2006).

El valle del Magdalena registra las menores tasas de precipitación total anual, que oscilan entre 1.000 y 1.500 mm/año, del total de los departamentos del Tolima y Huila. En el VCAM el régimen de lluvias durante el año es de tipo bimodal: se presentan dos épocas secas en el año, la primera en junio, julio y agosto, y la segunda en diciembre, enero y febrero, especialmente en el sector que comprende el departamento del Tolima, con la particularidad de que va siendo más marcada en dirección al centro y sur del departamento.

Respecto a la zona del VCAM correspondiente al departamento del Huila, se encuentra que hay una temporada seca principal más marcada a mitad de año (julio-septiembre) y una secundaria, menos significativa, entre enero y febrero. Al extremo sur del VCAM se inicia la transición hacia el régimen de la Amazonia y las temporadas secas son menos marcadas.

El número de días con lluvia sobre el valle del río Magdalena oscila entre 100 y 150, pero en áreas cercanas a los municipios de Aipe y Villavieja, en el Huila, pueden registrarse menos de 100. En la zona que corresponde al departamento del Tolima, la menor frecuencia se observa al oriente y oscila entre 50 y 150 días al año, mientras que las mayores frecuencias ocurren al occidente, con valores cercanos a 200 días lluviosos al año, en promedio.

Tomando como referencia cinco puntos en áreas aptas para el cultivo en el VCAM y promediando datos mensuales de 30 años (1994-2023) se encuentra que el primer semestre del año es más lluvioso, aunque hay una diferencia notoria en la disminución de la precipitación entre la zona del VCAM en el departamento del Tolima y la que corresponde al departamento del Huila en los dos semestres (figura 2.1).

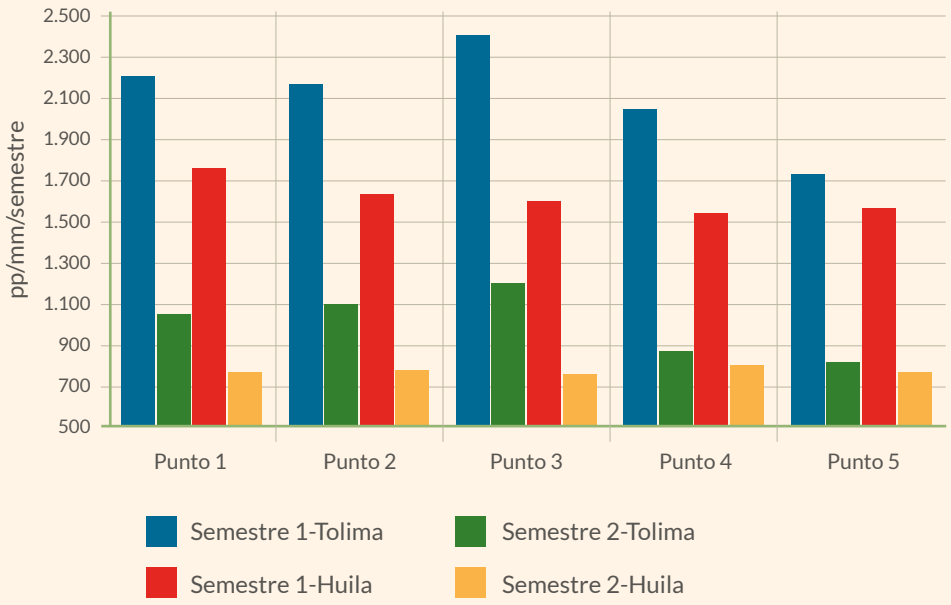


Figura 2.1. Precipitación en milímetros por semestre en el VCAM en cinco puntos de la región.

Fuente: Elaboración propia a partir de Abatzoglou et al. (2022).

Respecto a los rendimientos por hectárea, Jaramillo-Cardona (2019) reporta que, en arroz secano (siembra según el régimen de lluvias y sin utilizar riego), estos son 50 % más bajos que los obtenidos con riego. Además, se ha establecido que la frecuencia de inundaciones no es óbice en el cultivo de arroz (tabla 2.4) (UPRA, 2013). No obstante, en el caso del VCAM la relación beneficio-costo de la producción entre el uso de 16.000 m^3/ha/ciclo de agua y de 24.000 m^3/ha/ciclo representa el 1,2 %, lo cual no justifica la aplicación de volúmenes de agua mayores a 16.000 m^3/ha/ciclo (Montenegro et al., 2023).

Tabla 2.4. Escala de aptitud de la precipitación para el cultivo de arroz con riego

Variable	Mejores condiciones	Condición moderada	Condición marginal
Precipitación (mm/semestre)	1.200 a 1.500	1.000 a 1.200 y 1.500 a 2.000	< 1000
Frecuencia de inundaciones	Frecuente, ocasional, rara	No hay	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

Humedad relativa

La humedad relativa ideal para el cultivo de arroz en Colombia suele estar entre el 70 % y el 90 %, pues este rango favorece un buen crecimiento de la planta y ayuda a prevenir problemas como el estrés hídrico. Sin embargo, es importante considerar que el arroz se cultiva generalmente en terrenos inundados o en condiciones de elevada humedad, lo cual también contribuye a mantener este nivel de humedad relativa (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Escala de aptitud de la humedad relativa para el cultivo de arroz

Variable	Mejor condición	Condición moderada	Condición marginal
Humedad relativa (%)	70 a 90	100	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de Barrios-Pérez (2016).

Profundidad de los suelos

La profundidad en el cultivo de arroz con riego no suele ser una limitante, ya que, al comportarse como una pastura, permite que las semillas germinen adecuadamente y que las plántulas se desarrollen en un ambiente húmedo. Doorenbos y Kassam (1979) consideran profundidades mayores a 60 cm, pero la máxima profundidad de las raíces en algunas variedades es de aproximadamente 1 m cuando no hay una capa compacta en el subsuelo (tabla 2.6).

Tabla 2.6. Escala de aptitud de la profundidad de los suelos para el cultivo de arroz

Variable	Mejores condiciones	Condición moderada	Condición marginal
Profundidad de suelos (cm)	> 50	25 a 50	< 25

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

Textura de los suelos

Los suelos que retienen bastante agua, como los que tienen alto contenido de material arcilloso, son los mejores para cultivar arroz, especialmente cuando se usa la técnica de inundación durante su crecimiento. En particular, los suelos franco-arcillosos combinan propiedades de la arcilla y el limo, de manera que ofrecen un buen equilibrio entre retención de agua y drenaje, lo cual facilita el manejo del agua en sistemas de riego. Por esta razón, en el cultivo del arroz se prefieren los suelos arcillo-limosos o franco-arcillosos, preferentemente no calcáreos (tabla 2.7) (Benacchio, 1982).

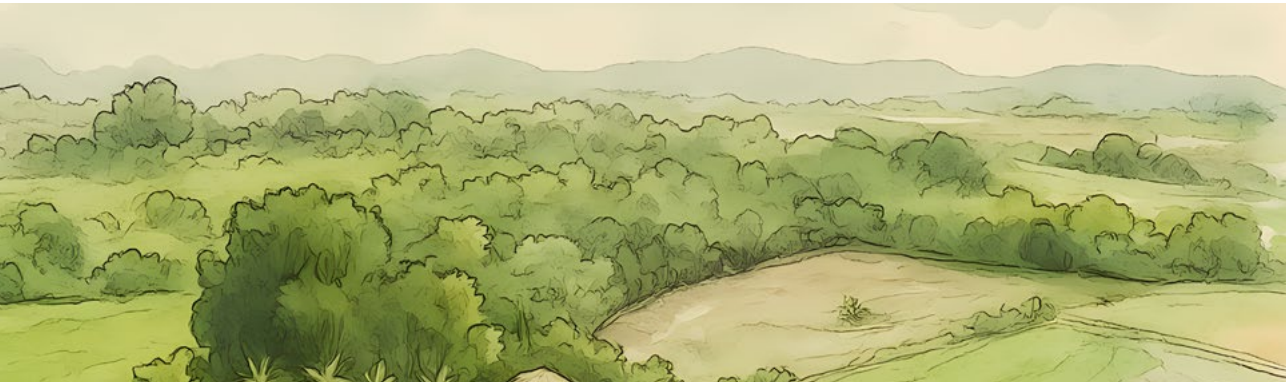


Tabla 2.7. Escala de aptitud de la textura del suelo para el cultivo de arroz riego con siembra mecanizada

Variable	Mejores condiciones	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Textura	Arcilloso franco (AF) Franco arcilloso (FAr) Arcilloso arenoso (ArA) Arcilloso limoso (ArL) Franco arcillo arenoso (FArA)	Franco (F) Limoso (L) Franco limoso (FL) Franco arenoso (FA) Arcilloso medio fino (Armf)	Arenoso (A) Arenoso franco (AF)
Arcilla en los primeros 15 cm (g/kg)	300 a 600	100 a 300	> 600 o < 100

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

Drenaje

Aunque el drenaje del suelo está correlacionado directamente con la textura, en el caso de la siembra de arroz de riego este debe ser manejado cuidadosamente para asegurar un balance adecuado de agua. Un drenaje moderadamente lento es ideal, ya que permite que el agua se mantenga en la superficie durante el crecimiento del arroz, pero que también se drene cuando sea necesario (tabla 2.8) (Benacchio, 1982).

Tabla 2.8. Escala de aptitud del drenaje del suelo para el cultivo de arroz de riego

Variable	Mejor condición	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Drenaje	Imperfectamente drenado. Moderadamente bien drenado.	Muy pobremente drenado, pobremente drenado y bien drenado.	Excesivo.

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

A continuación, se describe en detalle cada una de las condiciones presentadas en la tabla 2.8:

- **Imperfectamente drenado:** clase 2. El agua es eliminada del suelo con lentitud suficiente para mantenerlo completamente saturado en agua durante períodos muy apreciables, pero no todo el tiempo (por ejemplo, unos dos o tres meses al año). Los suelos imperfectamente drenados generalmente contienen una capa de permeabilidad lenta en el perfil; su capa freática es alta, reciben agua de infiltración o presentan una combinación de tales condiciones. El exceso de agua representa un importante factor limitante para la mayoría de los cultivos.
- **Moderadamente bien drenado:** clase 3. El agua se elimina del suelo con cierta lentitud, de modo que el perfil permanece saturado durante períodos cortos, pero apreciables (posiblemente menos de un mes al año). Los suelos moderadamente bien drenados generalmente tienen una capa de permeabilidad lenta en el *solum* o, inmediatamente por debajo, una capa freática relativamente elevada; reciben agua de infiltración o presentan alguna combinación de tales condiciones. El exceso de humedad no llega a constituir un serio factor limitante para los cultivos.
- **Muy pobremente drenado:** clase 0. El agua es eliminada del suelo tan lentamente que la capa freática permanece en la superficie o sobre esta la mayor parte del tiempo (suelo inundado durante más de seis meses al año, especialmente durante la estación de crecimiento del cultivo). Los suelos de esta clase de drenaje en general ocupan lugares llanos o deprimidos y están frecuentemente encharcados.
- **Pobremente drenado:** clase 1. El agua es eliminada tan lentamente que el suelo permanece inundado durante largos períodos apreciables (generalmente de seis a tres meses al año). La capa freática está generalmente en la superficie o cerca de esta durante una parte considerable del año. El escaso drenaje se debe a una capa freática alta, a una capa de permeabilidad lenta en el perfil, a infiltración o a una combinación de tales condiciones. La mayoría de los cultivos no se pueden desarrollar en estos suelos.

Régimen de humedad del suelo

El régimen de humedad del suelo ideal para el cultivo de arroz debe permitir o facilitar que el suelo se mantenga inundado durante gran parte del ciclo de crecimiento, con el fin de mantener una capa de agua de entre 5 cm y 10 cm sobre el nivel del suelo. Durante la fase de desarrollo, es crucial que el suelo esté constantemente húmedo y evitar que se seque, ya que el arroz es una planta que necesita un ambiente saturado. Sin embargo, en la etapa de maduración, es importante permitir que el agua se drene para favorecer la cosecha y la calidad del grano. Los regímenes de humedad del suelo más adecuados son aquellos que permanecen inundados o con el nivel freático muy cerca de la superficie (tabla 2.9).

Tabla 2.9. Escala de aptitud del régimen de humedad de los suelos para el cultivo de arroz de riego

Variable	Mejor condición	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Régimen de humedad del suelo	Acuico, údico, perúdico	Ústico, peracuico	Arídico

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013).

A continuación, se describe en detalle cada una de las condiciones presentadas en la tabla 2.9:

- Acuico: el suelo está saturado con agua por lo menos unos pocos días y en un ambiente virtualmente libre de oxígeno disuelto, pues está saturado por agua o por el agua del borde capilar.
- Údico: el suelo no está seco en ninguna parte de la sección de control durante más de 90 días acumulativos por año.
- Perúdico: la precipitación excede la evapotranspiración todos los meses en la mayoría de los años. El nivel freático siempre está muy cerca o en la superficie.

- Ústico: suelo húmedo en un período tal que las condiciones son propicias para el crecimiento de las plantas. La sección de control está seca durante 90 o más días acumulativos por año. Sin embargo, la sección de control es húmeda en alguna parte durante más de 180 días acumulativos por año o durante 90 o más días consecutivos.
- Peracuico: el suelo está saturado con agua la mayor parte del año.
- Arídico: a) Seco en todas sus partes durante más de la mitad de los días acumulativos por año, cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es mayor de 5 °C. b) La humedad en alguna o en todas sus partes no ocurre en períodos tan largos como 90 días consecutivos cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es mayor de 8 °C.

Pendiente del terreno

El cultivo de arroz en condiciones de riego, especialmente en sistemas de inundación, se prefiere generalmente en terrenos planos o con pendientes muy suaves de máximo hasta 3 %. Estas pendientes permiten un adecuado manejo del agua y reducen el riesgo de erosión, al tiempo que facilitan la inundación necesaria para el crecimiento del arroz (tabla 2.10).

El arroz en secano se puede cultivar en pendientes de hasta aproximadamente 10 %, aunque las pendientes más acentuadas (entre 5 % y 10 %) pueden aumentar el riesgo de erosión y dificultar el manejo del agua.

Tabla 2.10. Escala de aptitud del gradiente de pendiente para el cultivo de arroz de riego

Variable	Mejor condición	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Pendiente (gradiente de pendiente (%))	0 a 3	3 a 7	> 7 y < 8

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013), Almaguer (2008), Fedearroz (2012) y Tascón y García (1985).

Pedregosidad

La pedregosidad en la superficie del suelo es una limitante de importancia en el cultivo de arroz cuando se desarrolla con siembra mecanizada (tabla 2.11).

Tabla 2.11. Escala de aptitud de la pedregosidad para el cultivo de arroz riego con siembra mecanizada

Variable	Mejor condición	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Pedregosidad en los primeros 5 cm (cm^3/dm^3)	< 100 (10%)	100 a 150 (10% a 15%)	> 150 (>15%)

Fuente: Elaboración propia.

pH

El pH corresponde a un requerimiento que, si bien es manejable a través de enmiendas, es muy importante en cuanto a la disponibilidad de nutrientes para la planta. El rango óptimo de pH es de 5.5 a 6.5 en suelo seco y de 7.0 a 7.2 en suelo inundado (5.2-8.0) (Benacchio, 1982). El pH óptimo está entre 5.5 y 6.0 (tabla 2.12) (Doorenbos & Kassam, 1979).

Tabla 2.12. Escala de aptitud del potencial de hidrógeno (pH) para el cultivo de arroz

Variable	Mejores condiciones	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
pH	6,0 a 6,5	5,5 a 6,0	Menor a 5,5 o mayor a 7,0

Fuente: Elaboración propia a partir de Dekagro (s. f.).



Salinidad/sodicidad (conductividad eléctrica)

Aunque el arroz es una especie tolerante a la salinidad (Benacchio, 1982), las disminuciones de rendimiento por distintos niveles de salinidad son:

0 % para una conductividad eléctrica (CE) de 3,0 dS m^{-1};
10 % para una CE de 3,8 dS m^{-1}.
25 % para una CE de 5,1 dS m^{-1}.
50 % para una CE de 7,2 dS m^{-1}.
100 % para una CE de 11 dS m^{-1} (tabla 2.13) (Ayers & Westcot, 1985).

Tabla 2.13. Escala de aptitud de salinidad/sodicidad (conductividad eléctrica) para el cultivo de arroz riego

Variable	Mejor condición	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Salinidad/ sodicidad (CE)	< 3 dS/m	3,8 a 5 dS/m	> 5 dS/m

CE: conductividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ayers y Westcot (1985).

Fertilidad del suelo

El consumo de nutrimentos por parte de un cultivo de arroz con una producción de biomasa de 33.21 t ha^{-1}(Amador & Bernal, 2012) se presenta en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Consumo de nutrimentos por parte de un cultivo de arroz

Nutrimentos (kg/ha)										
N	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**S**	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**B**
304	71,1	559,1	56,8	49,6	28,8	0,76	9,06	23,59	2,0	0,24

Fuente: Amador y Bernal (2012).

La extracción promedio de nutrimentos (kg) por tonelada de grano producido es la siguiente:

N: 15 kg/t de grano producido.
P: 3 kg/t de grano producido.
K: 3 kg/t de grano producido
Ca: 0,16 kg/t de grano producido.
S: 1 kg/t de grano producido.
B: 0,008 kg/t de grano producido (Cruzate & Casas, 2009).

Fertilidad química del suelo

La fertilidad química se refiere a la capacidad que tiene el suelo de proveer nutrientes esenciales a los cultivos. La tabla 2.15 utiliza la fórmula de Ortega (1987) a partir de los parámetros químicos cualificados en intervalos establecidos por Ortega (1994).

$$FT: (0,7\ F1 + 0,3\ F2) * K$$

Donde:

FT: fertilidad total.
F1: fertilidad de los primeros 25 cm de profundidad de los suelos.
F2: fertilidad entre los 25 cm y 50 cm de profundidad de los suelos.
K: constante igual a 0,285.

La apreciación es:

FT > 8,4 = muy alta
FT = 8,4 a 6,8 = alta
FT = 6,7 a 5,2 = moderada
FT = 5,1 a 3,6 = baja
FT< 3,6 = muy baja

Con base en esta información se puede establecer que, si bien el arroz no es muy exigente en fertilidad química, sí es importante establecer cuál mineral es deficiente.

Tabla 2.15. Escala de aptitud de la fertilidad química del suelo para el cultivo de arroz

Variable	Mejores condiciones	Condiciones moderadas	Condiciones marginales
Fertilidad química del suelo	> 5,2	5,1 a 3,6	< 3,6

Fuente: Elaboración propia a partir de Ortega (1994).

De acuerdo con la clasificación de Ortega (1987), el cultivo de arroz requiere una fertilidad moderada.

Aptitud edafoclimática del cultivo de arroz en el VCAM

Teniendo en cuenta la escala de aptitud de las variables: altura sobre el nivel del mar (m s. n. m.), precipitación, gradiente de pendiente, cantidad de arcilla del suelo en los primeros 15 cm y pedregosidad en los primeros 5 cm, se realizó el mapa de la figura 2.2. Ponderando las variables de acuerdo con la importancia (tabla 2.16) y priorizando la aptitud para la producción de arroz de riego y siembra mecanizada, la aptitud se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Aptitud} = \sum (\text{m s. n. m.} * 0{,}10) + (\text{precipitación} * 0{,}10) + (\text{pendiente} * 0{,}25) + (\text{arcilla} * 0{,}25) + (\text{pedregosidad} * 0{,}30).$$

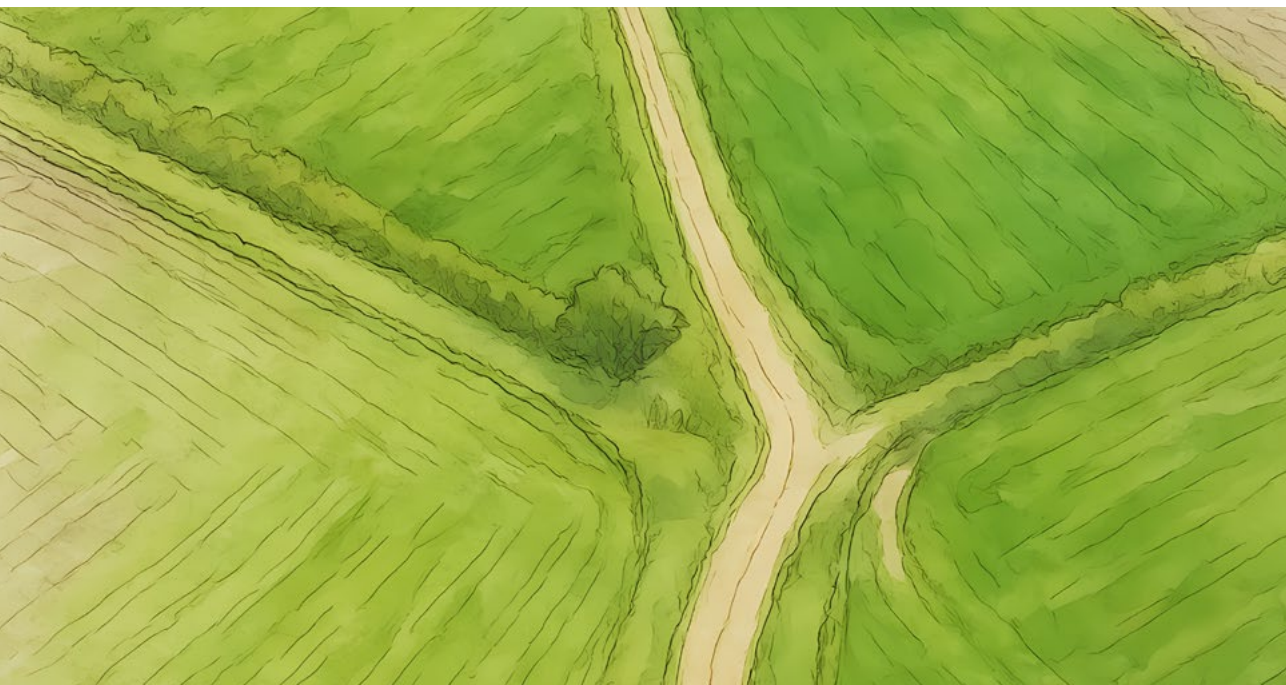
Donde el resultado de la sumatoria determina la aptitud de las condiciones:

Mayor a 30: mejores condiciones.
Entre 20 y 30: condiciones moderadas.
Entre 10 y 20: condiciones marginales.
Menor a 10: no apto.

Tabla 2.16. Ponderación de las variables utilizadas para zonificar la aptitud edafoclimática del cultivo de arroz riego y siembra mecanizada en el VCAM

Variables	Unidades	Ponderación
m s. n. m.	m	0,10
Precipitación	mm/semestre	0,10
Pendiente	%	0,25
Arcilla	g/kg	0,25
Pedregosidad	cm^3/dm^3	0,30

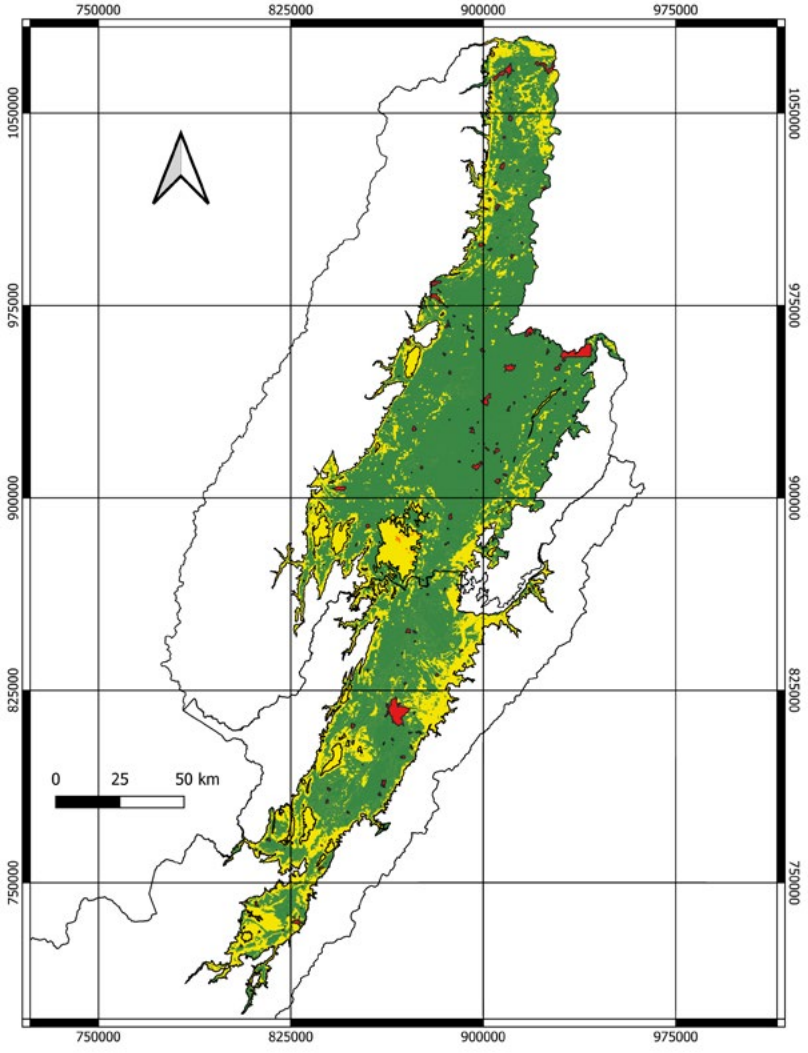
Fuente: Elaboración propia.



a

Aptitud de uso edafoclimática para el cultivo del arroz mecanizado (secano y riego) en el VCAM. Primer semestre

Leyenda		Ha	%
1	Mejores condiciones	1.151.197	71,1
2	Condición moderada	440.181	27,2
3	Condición marginal	23.969	1,5
4	No apto	3.448	0,2
TOTAL		**1.618.794**	**100,0**
——	Límite de departamento		



b

Aptitud de uso edafoclimática para el cultivo del arroz mecanizado (secano y riego) en el VCAM. Segundo semestre

Leyenda		Ha	%
1	Mejores condiciones	915.102	56,5
2	Condición moderada	674.821	41,7
3	Condición marginal	25.596	1,6
4	No apto	3.604	0,2
TOTAL		**1.619.123**	**100,0**
——	Límite de departamento		

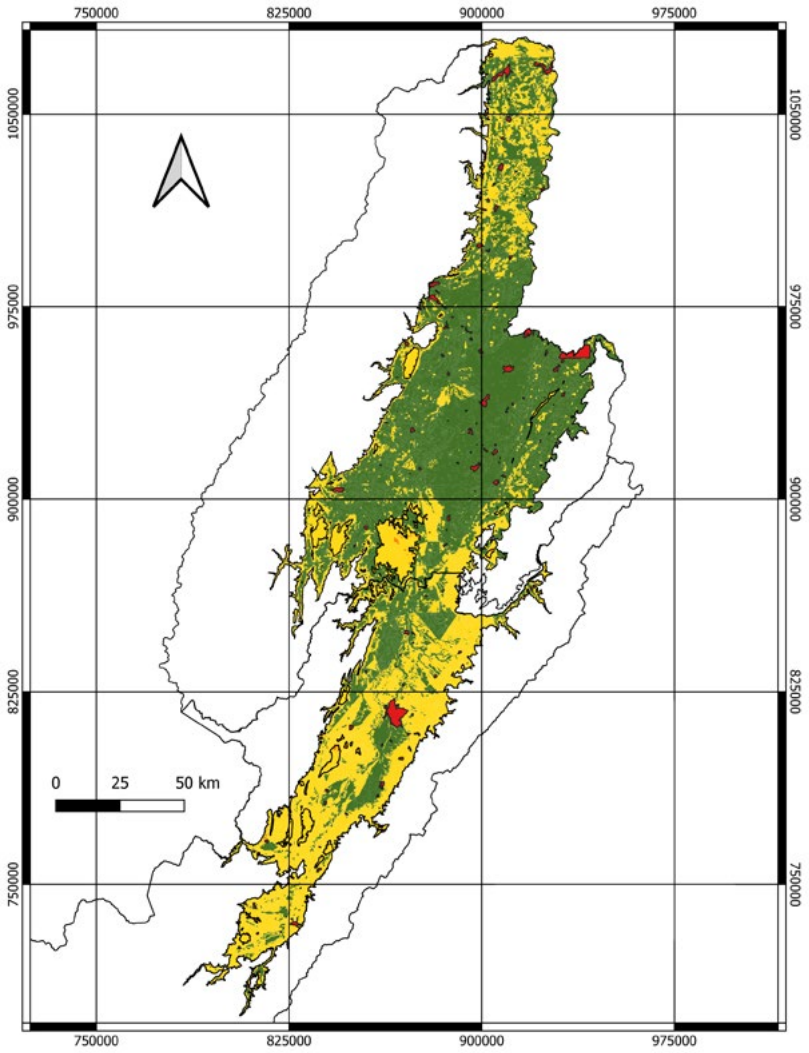


Figura 2.2. Aptitud edafoclimática para el cultivo de arroz en el VCAM.

a. Primer semestre; **b.** Segundo semestre.

Fuente: Elaboración propia a partir de UPRA (2013), Poggio et al. (2021) e Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1994, 2004).

Variabilidad climática en el cultivo de arroz

El arroz es un cultivo alimentario fundamental, pero su crecimiento y productividad son afectados por el cambio y la variabilidad climáticos. La disminución en la producción y la creciente demanda son consecuencias directas de este fenómeno, lo cual impacta la seguridad alimentaria y la economía mundial. Entre los impactos del cambio climático se encuentra el aumento prolongado de la temperatura global, lo cual provoca sequías, inundaciones y tormentas tropicales, altera la distribución de las precipitaciones y genera la degradación del suelo. El cultivo de arroz es particularmente vulnerable a estas condiciones extremas del clima, sobre todo a las altas temperaturas, que son su principal amenaza (Hussain et al., 2020; Sarwar et al., 2022).

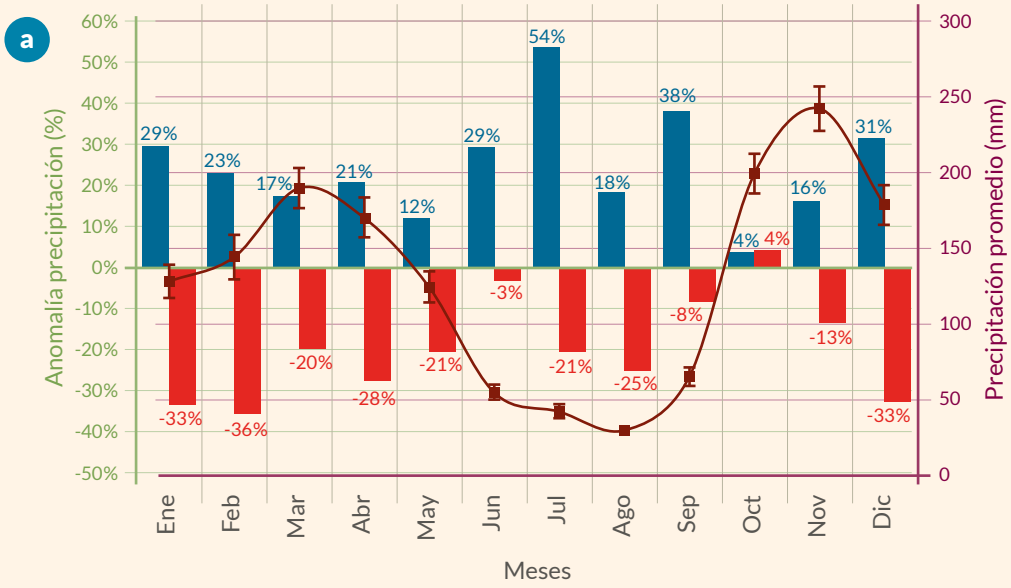
En Colombia, el cambio climático ha impactado el cultivo de arroz porque disminuye la capacidad de ahorro del agua de riego. El aumento de la variabilidad de las precipitaciones y períodos más secos y cálidos dificulta actualmente que los agricultores dispongan de agua suficiente en el lugar adecuado y en el momento oportuno (Loaiza et al., 2024). Para hacer frente a esta situación, se han recomendado tecnologías de ahorro de agua ampliamente estudiadas en el cultivo de arroz, como el riego alternado secado (AWD, por las siglas en inglés de *alternate wetting and drying*), que en diferentes condiciones climáticas y de suelo ha disminuido el uso del agua entre 20 % y 44 % (Carrijo et al., 2017; Hasan et al., 2016; Lampayan et al., 2015; Liang et al., 2016).

En el VCAM, la variabilidad climática impacta directa e indirectamente el cultivo de arroz. En 2018, el departamento del Tolima estableció el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Tolima (PIGCCT). Este documento resalta que el cultivo de arroz en el Tolima enfrenta una elevada amenaza en términos de vulnerabilidad climática, como se refleja en el cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas para su cultivo (Cortolima, 2018). La situación es preocupante por las proyecciones que se han realizado sobre los

cambios en la aptitud edafoclimática para el cultivo de arroz en el escenario 2011-2040. De las 41.972,4 ha adecuadas para el cultivo de arroz con las que se cuenta actualmente, solo el 61,1 % se mantendrían aptas, mientras que el 38,9 %, equivalente a 16.318,4 ha, podrían dejar de serlo (Cortolima, 2018). En el caso del Huila, el *Plan de cambio climático Huila 2050: preparándose para el cambio climático* indica que la proyección a 2030 no parece afectar mucho la aptitud para el cultivo del arroz, pero sí la disponibilidad del agua, la cual representa un insumo crítico para este cultivo y puede disminuir en el futuro (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2014).

Teniendo en cuenta que se proyecta que casi el 51 % del cultivo y la producción de arroz se reducirán durante el próximo siglo debido al cambio climático global (Hussain et al., 2020), es importante definir los impactos de la variabilidad climática, el efecto del estrés abiótico y las recomendaciones para establecer estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático en el cultivo de arroz para el VCAM.

A continuación, con base en estudios históricos sobre los impactos que han ocasionado los fenómenos de El Niño y La Niña en dos zonas productivas arroceras de la región, la figura 2.3 presenta la información relacionada con las anomalías de precipitación (%) y la precipitación promedio (mm) a lo largo de los meses del año, diferenciando entre los fenómenos de La Niña (barras azules) y El Niño (barras rojas). Esta información proviene de datos climáticos históricos de estaciones de dos zonas productoras arroceras del VCAM: la primera está ubicada en el norte-centro del Huila (con datos de 1985 a 2018) y la segunda en la zona que abarca el distrito de riego de Usocoello (con datos de 1980 a 2011) (Corpoica, 2016; IDEAM, 2022). Las anomalías son calculadas con el Índice Niño Oceánico (ONI). Los valores positivos del ONI (≥ 0,5 °C) durante cinco o más meses consecutivos evidencian la ocurrencia del fenómeno de El Niño (año seco). De lo contrario, valores negativos de ONI (≤ -0,5 °C) durante cinco o más meses consecutivos indican la ocurrencia del fenómeno de La Niña (año húmedo) (CPC-NOOA, 2024).



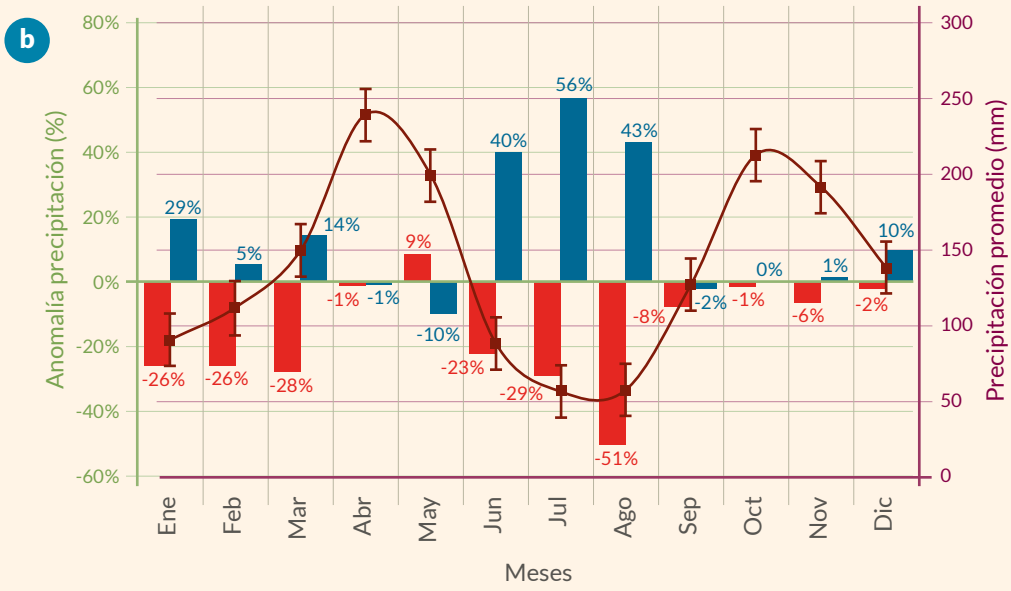


Figura 2.3. Anomalías de las precipitaciones según el Índice Niño Oceánico (ONI) en el VCAM. Las barras mensuales indican el error estándar. **a.** Zona centro y norte del Huila; **b.** Zona del distrito de riego Usocoello en el Tolima.

Fuente: Elaboración propia a partir de Corpoica (2016) e IDEAM (2022).

Entre los principales hallazgos se observa que en ambas regiones hay un régimen bimodal de distribución de precipitación histórica (figura 2.1). En particular, se encuentra que durante el fenómeno de La Niña el mes de julio representó la anomalía más alta en ambas zonas (+54 % y +56 %), lo cual indica que ese mes llovió entre el 54 % y el 56 % más de lo que normalmente se esperaría en un año promedio. En este sentido, es importante manejar el posible exceso de lluvias, pues puede causar problemas como inundaciones, encharcamiento de cultivos, erosión de suelos y problemas con la infraestructura. Frente a esta situación se pueden implementar algunas acciones, como manejar el agua con sistemas de drenaje eficientes, proteger el suelo con prácticas de conservación como el uso de coberturas y planificar las fechas de siembra (Apriyana et al., 2021; León et al., 2020; Malau et al., 2021).

En cuanto a las anomalías que genera el fenómeno de El Niño en el departamento del Huila, se encuentra que los meses de diciembre, enero y febrero son los más críticos, con -33 %, -33 % y -36 % de precipitaciones, respectivamente, mientras que en la zona del Tolima se destacó el mes de agosto, con -51 %.

El déficit de lluvias que genera el fenómeno de El Niño puede derivar en sequías, disminuir la disponibilidad de agua y reducir el rendimiento de los cultivos. Algunas acciones para manejar esta situación pueden ir encaminadas a almacenar agua, ajustar las fechas de siembra para coincidir con la disponibilidad de agua en los meses menos afectados por la sequía e implementar sistemas de riego tecnificados (Chaali et al., 2020; Diem et al., 2024; Massey et al., 2022).

Impacto de la variabilidad climática

Debido al rápido cambio climático, existen muchos factores abióticos como la pluviosidad, la sequía, las inundaciones, la temperatura y las radiaciones solares que están impactando gravemente la producción de arroz en las distintas fases de crecimiento (Hussain et al., 2020). La luminosidad, la

precipitación, la humedad relativa y los vientos son los principales elementos del clima que tienen incidencia sobre el cultivo (Castillo et al., 2010). En especial, la temperatura es un factor climático de gran importancia, pues las temperaturas diurnas y nocturnas regulan diversos procesos en la planta, como el crecimiento, el desarrollo y la productividad. Específicamente, las temperaturas afectan la tasa de fotosíntesis durante el día con rangos óptimos que cambian según las variedades, pero los más favorables oscilan entre 32 °C y 35 °C. Este aspecto se debe tener en cuenta sobre todo durante la floración del cultivo, pues en este momento es más susceptible a las condiciones de alta temperatura (Garcés & Medina, 2018).

Pero el cultivo de arroz no solo resulta afectado por la variabilidad y el cambio climático, sino que también incide en esta problemática, pues provoca la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, principalmente por dos vías: los arrozales inundados —como se cultiva en el VCAM— liberan grandes cantidades de CO_2, CH_4 y N_2O, mientras que la quema de paja de arroz y su incorporación directa al suelo produce CH_4 (figura 2.4). De hecho, las emisiones anuales de CH_4 procedentes de los suelos de arroz se han evaluado en 36 teragramos (Tg) anuales, lo cual representa aproximadamente el 18 % del total de las emisiones antropogénicas de CH_4 a la atmósfera (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013; Tivet & Boulakia, 2017).



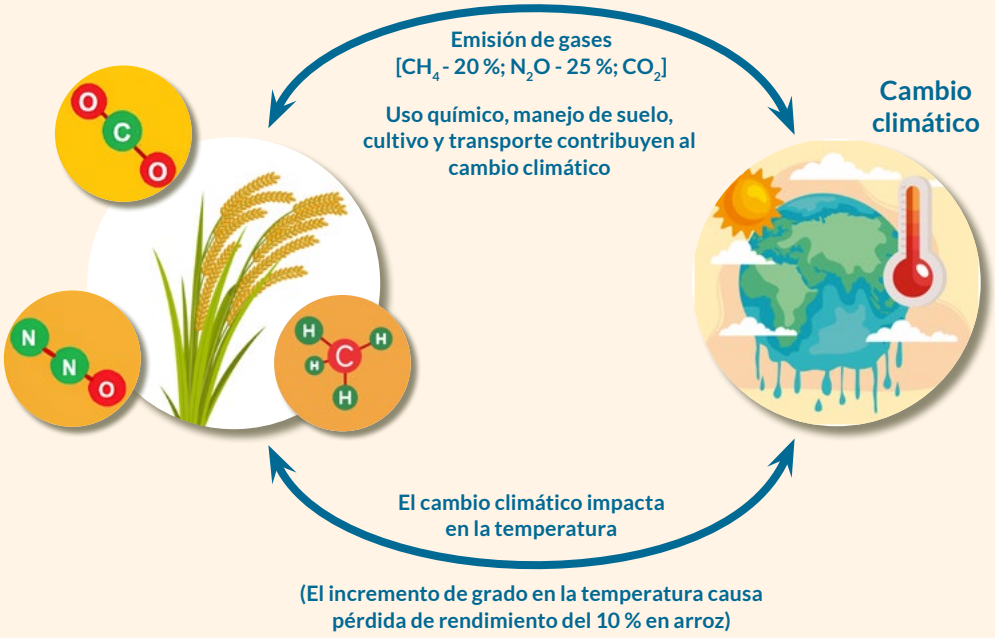


Figura 2.4. Relación de los efectos e impactos entre el cambio climático y el cultivo de arroz.

Fuente: Elaboración propia a partir de Hussain et al. (2020) con imágenes de Vecteezy.com.

Ahora bien, entre los principales impactos de la variabilidad climática en el cultivo de arroz se tienen el aumento de plagas y enfermedades, el estrés hídrico, los cambios en el ciclo del cultivo, problemas en la calidad del grano, reducción del rendimiento, aumento de los costos de producción, entre otros (figura 2.5). En primera instancia, el cambio climático impacta la ecología de los insectos, pues influye en la intensidad de las plagas y los brotes. Factores ambientales clave como la temperatura, la humedad y la lluvia son determinantes en el desarrollo de los insectos y sus enemigos naturales (Rezvi et al., 2023). La temperatura, como factor abiótico dominante, afecta directamente a los insectos herbívoros, y su tasa de desarrollo está fuertemente influida por los cambios en la temperatura (Tuihedur-Rahman et al., 2018). De hecho, investigaciones muestran que,

a medida que aumenta la temperatura global, los ciclos de vida de los insectos se acortan, lo cual genera una reproducción más rápida y poblaciones de plagas mayores (Gutiérrez et al., 2008).

Otro impacto está relacionado con el estrés hídrico. El arroz es muy sensible al déficit hídrico, pues potenciales hídricos elevados (-0,75 MPa) inician el cierre estomático, lo cual reduce gradualmente la transpiración. Además, el estrés hídrico provoca enrollamiento y senescencia de las hojas, de manera que se disminuye el área foliar y la intercepción de luz, lo cual reduce la fotosíntesis y la biomasa, y, por lo tanto, afecta negativamente la eficiencia del uso de la radiación y la producción total de arroz. También se debe tener en cuenta que la escasez de agua durante la floración es especialmente crítica, ya que incrementa la esterilidad de la espiguilla, lo cual afecta gravemente la productividad del cultivo (Ekanayake et al., 1989; Surendran et al., 2021).

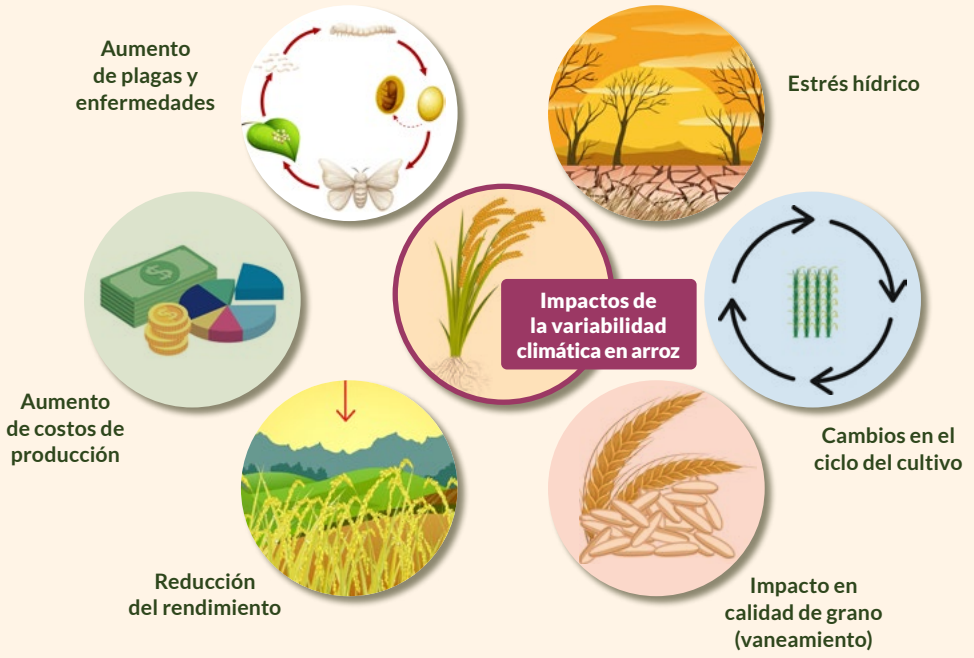
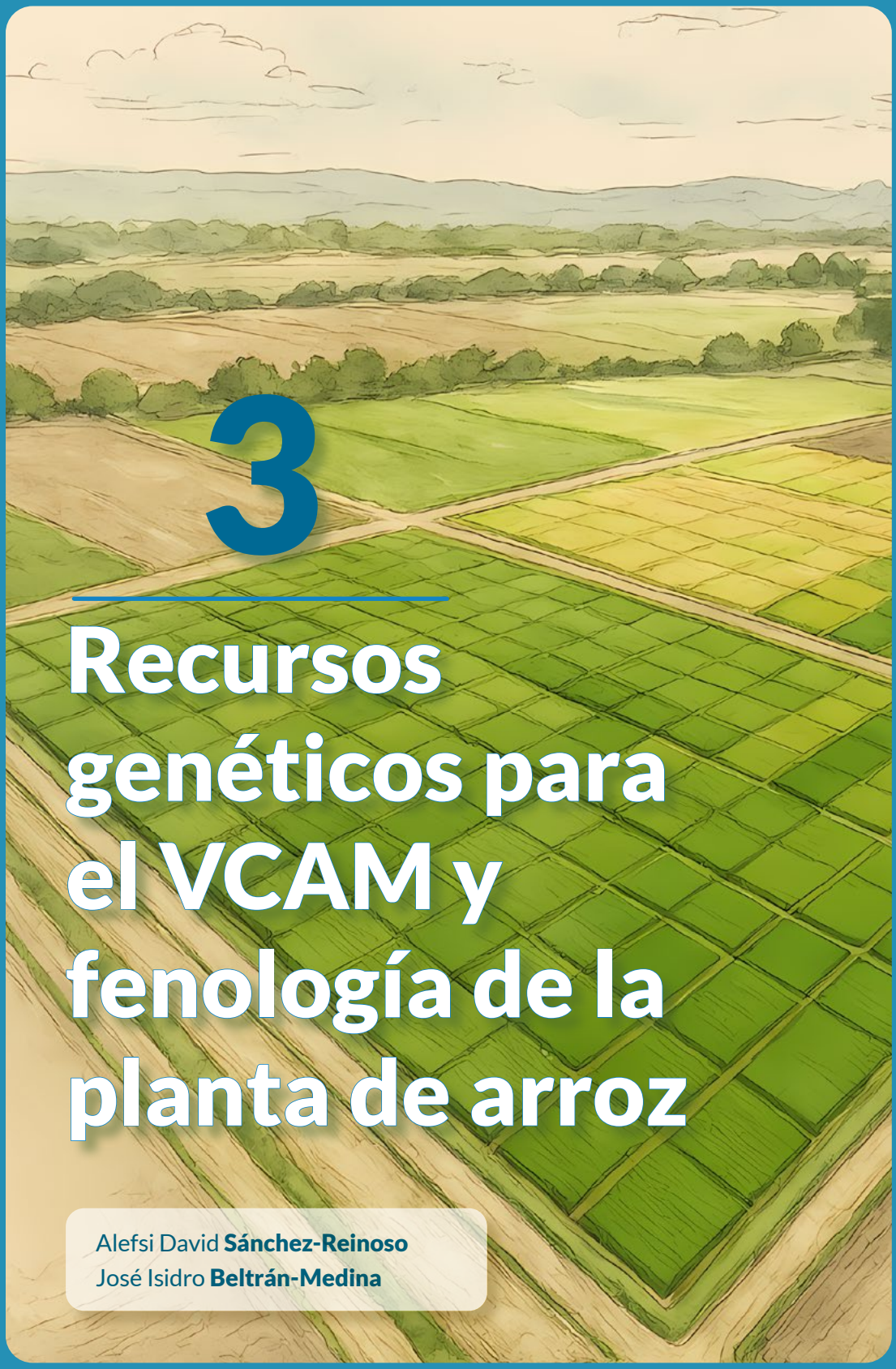


Figura 2.5. Principales impactos de la variabilidad climática en el cultivo de arroz.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.



3

Recursos genéticos para el VCAM y fenología de la planta de arroz

Alefsi David **Sánchez-Reinoso**
José Isidro **Beltrán-Medina**

Introducción

En este capítulo se presenta brevemente la historia de la domesticación del cultivo de arroz, enfocada principalmente en la especie *Oryza sativa* L. En general, se expone el centro de origen de los ancestros de la planta de arroz y se relaciona un mapa conceptual de las especies cercanas a la de nuestro interés agronómico. Posteriormente, se muestra la morfología de una planta típica de arroz, tanto en la fase vegetativa como en la fase reproductiva. Seguidamente, se describe la fenología con sus respectivas etapas de crecimiento y desarrollo, así como los rangos de tiempo que suelen tomar cada una de ellas. Finalmente, se resaltan algunos rasgos agronómicos deseados para el cultivo de arroz de alto rendimiento y calidad, además de la descripción de las principales características de los cultivares de arroz que actualmente se usan con mayor frecuencia en el VCAM.

Origen y grupos genéticos

La planta de arroz (*Oryza sativa* L.) es una gramínea anual que pertenece a la familia Poaceae. Es ampliamente cultivada en regiones tropicales y subtropicales, aunque también se adapta a regiones con climas templados (Pérez-Lotz, 2016). En general, la domesticación del arroz comenzó aproximadamente hace más de 10.000 años, en dos regiones principales del mundo: el valle del Yangtsé en China y el valle del Ganges en India, donde se originó *Oryza sativa*, la especie de arroz más cultivada en el mundo (figura 3.1).

Durante esta primera etapa de domesticación se involucró la selección de plantas con rasgos adaptativos favorables, como una mayor producción de semillas y la reducción de la dispersión natural de los granos, los cuales facilitaron su cosecha. A lo largo del tiempo, los agricultores fueron seleccionando genotipos cuyo comportamiento agronómico se adaptó a los ambientes locales, lo cual dio lugar a la diversificación de *Oryza sativa* en dos subespecies principales: *Indica*, que prospera en climas tropicales, y *Japonica*, adaptada a climas más templados (Fornasiero et al., 2022).

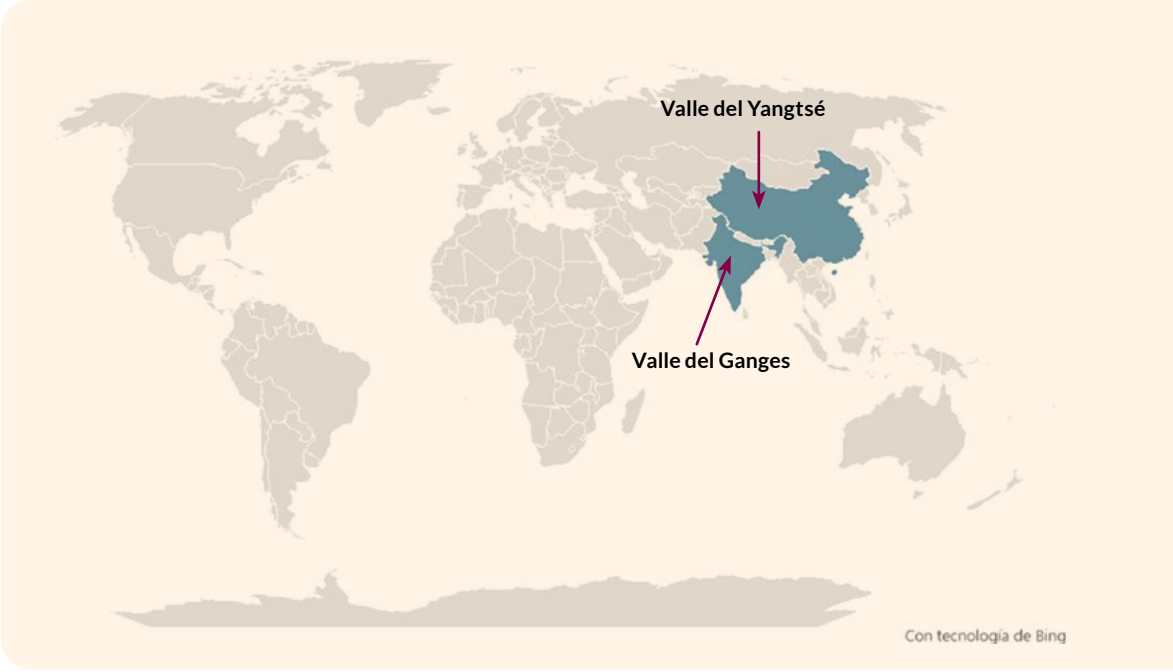


Figura 3.1. Centros de domesticación del arroz: valle del Yangansé en China y valle del Ganges en India.

Fuente: Elaboración propia.

Paralelamente, en África Occidental se domesticó una especie de arroz diferente, *Oryza glaberrima*, hace aproximadamente 3.000 años. A diferencia de *Oryza sativa*, esta especie fue seleccionada por su capacidad de resistir condiciones ambientales adversas, como inundaciones y sequías, adaptándose a las fluctuaciones climáticas de la región (Roychoudhury, 2020). Aunque *Oryza glaberrima* es menos productiva y ha sido reemplazada en gran medida por *Oryza sativa* en África, sigue siendo una importante fuente de diversidad genética para el mejoramiento de variedades resistentes (figura 3.2).

La domesticación del arroz se expandió a través de rutas comerciales hasta llegar a Persia, Europa y más tarde al continente americano durante la colonización. En el siglo XX, la Revolución Verde introdujo variedades híbridas de arroz de alto rendimiento, lo cual impulsó la producción en muchas regiones del mundo (Chávez et al., 2010). Hoy en día, los avances en biotecnología y la

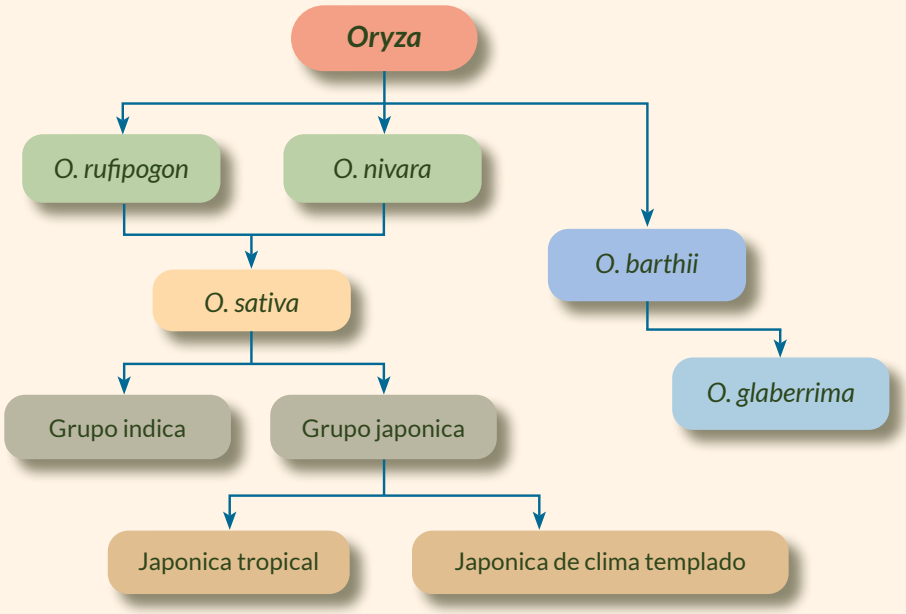


Figura 3.2. Esquema secuencial del proceso de domesticación de *Oryza sativa*.
Fuente: Adaptado de Fornasiero et al. (2022) y Roychoudhury (2020).

edición genética permiten desarrollar nuevas variedades de arroz que combinan productividad con resistencia a plagas, enfermedades y estrés climático, lo cual contribuye a la seguridad alimentaria global.

Morfología de la planta de arroz

Esta especie vegetal ha evolucionado para crecer en condiciones de inundación parcial o total, lo cual le permite establecerse en terrenos donde otros cultivos no podrían sobrevivir. En este sentido, la planta ha adaptado su morfología a través del desarrollo de estructuras especializadas que le permiten manejar grandes cantidades de agua y crecer en suelos anegados (formación de aerénquima).

Esta capacidad de adaptación se observa tanto en su sistema de raíces y en su arquitectura del dosel, que se evidencia en la disposición de las hojas y tallos (Awanis et al., 2021). En este sentido, la figura 3.3 ilustra la morfología de una planta de un genotipo de arroz en etapa vegetativa y reproductiva que ha sido cultivado en el norte del Huila. Aquí se destaca como rasgo importante la arquitectura de planta ideal, compuesta por un grupo de hojas planófilas en la sección basal de la planta, seguida por un grupo de hojas plagiófilas en la parte central de la planta y, finalmente, un pequeño grupo de hojas erectófilas. Esta distribución permite ajustar diferentes densidades de siembra, hace que las plantas sean más eficientes en la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y promueve la tasa de fotosíntesis.

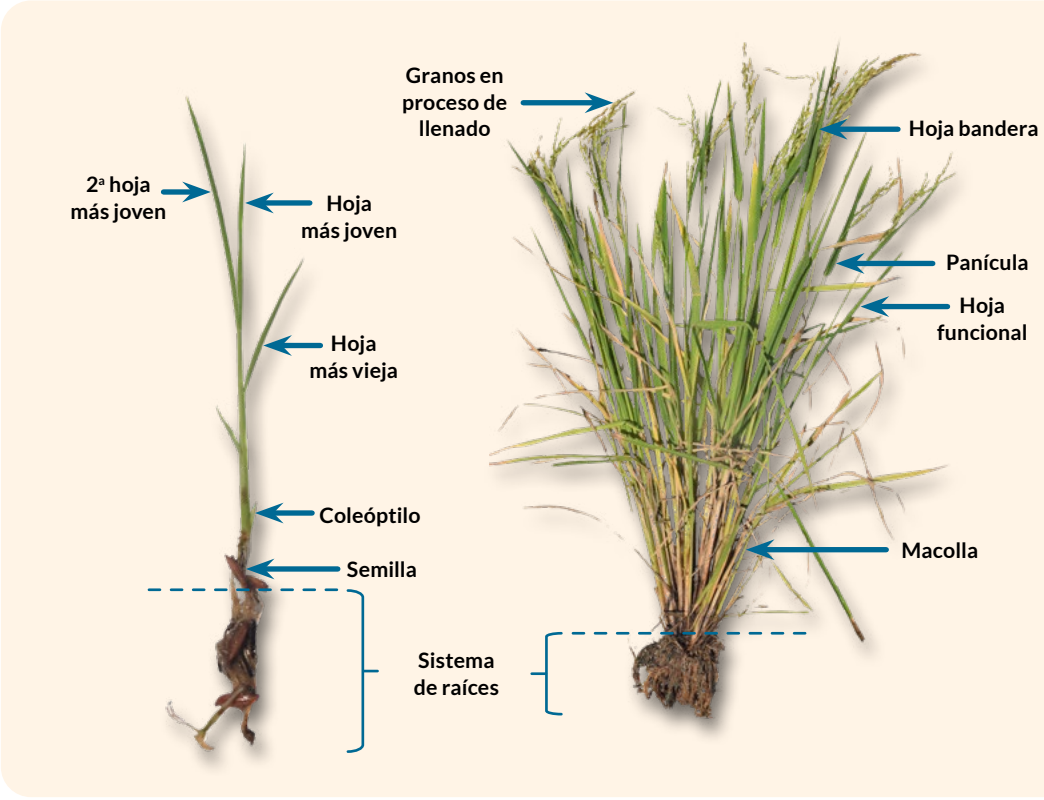


Figura 3.3. Morfología de la planta de arroz en etapa vegetativa y en etapa reproductiva.

Fuente: Elaboración propia.
Fotos: Alefsi David Sánchez-Reinoso.

Por otro lado, la figura 3.4 muestra las estructuras que componen los órganos reproductivos de la planta de arroz. Aquí destaca principalmente la conformación de la panícula, la cual es una inflorescencia racimosa compuesta por la agrupación de espiguillas. En esta estructura también resalta la hoja bandera, siendo la hoja funcional, principal en el proceso de llenado de los granos (Wu et al., 2017). Cabe resaltar que la flor de la planta de arroz es hermafrodita y cuenta con estambres y pistilos. Como se indicó en apartados anteriores, la floración es una etapa sensible a condiciones de estrés, como altas temperaturas y déficit hídrico, lo cual causa esterilidad de las espigas (Rang et al., 2011).

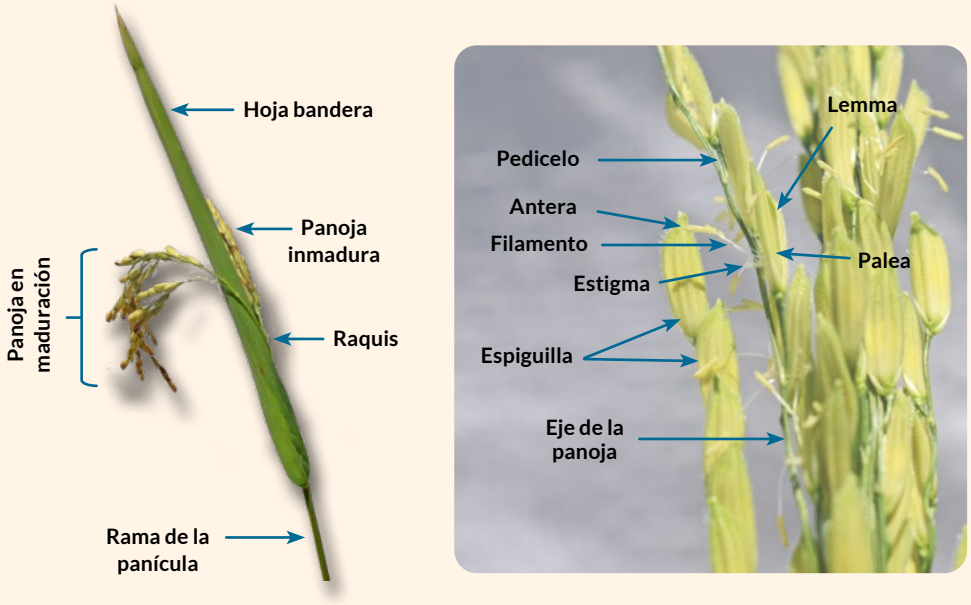


Figura 3.4. Morfología de la panícula y flores de las plantas de arroz.

Fuente: Elaboración propia.

Fotos: Alefsi David Sánchez-Reinoso.

Fenología

La fenología del cultivo de arroz comprende tres fases principales: vegetativa, reproductiva y de maduración (figura 3.5). La fase vegetativa está conformada por tres etapas fenológicas, siendo la primera la etapa de *emergencia*, seguida por el *inicio del macollamiento* y finalizando con el *máximo macollamiento*. En general, la duración de la fase vegetativa puede oscilar desde los 20 hasta los 35 días después de emergencia (DDE) y dicho tiempo depende tanto del genotipo como de las condiciones agroclimáticas. Con respecto a la fase reproductiva, podemos evidenciar las etapas fenológicas de *inicio de primordio de panícula*, *embuchamiento* y *floración*. En adición, la fase reproductiva comienza aproximadamente a partir de los 32 DDE y se puede extender hasta los 90 DDE. Finalmente, la fase de maduración comprende el desarrollo de los granos en la panícula y se destacan las etapas de *estado lechoso*, *estado pastoso* y *madurez fisiológica*. En algunos genotipos puede presentarse a partir de los 80 DDE y puede extenderse hasta los 125 DDE (tabla 3.1).

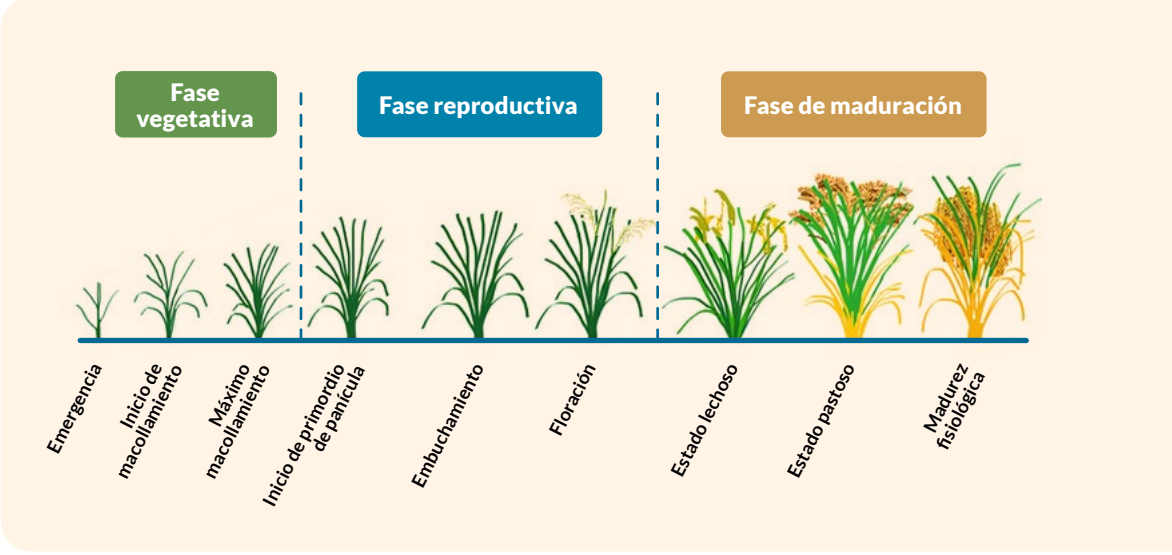


Figura 3.5. Fenología del cultivo de arroz.

Fuente: Adaptado de Aguilar-Ariza (2019).

Tabla 3.1. Descripción de las fases y etapas fenológicas del cultivo de arroz

Fase	Etapa	Sigla	Duración (DDE)
Vegetativa	Emergencia	E	4-6
	Inicio de macollamiento	IM	7-18
	Máximo de macollamiento	MM	20-35
Reproductiva	Inicio de primordio de panícula	IPF	32-45
	Embuchamiento	B	55-72
	Floración	F	65-90
Maduración	Estado lechoso	GL	80-105
	Estado pastoso	GP	85-112
	Madurez fisiológica	MF	92-125

Fuente: Adaptado de Sánchez-Reinoso et al. (2019) y Ospina-Gómez et al. (2024).

Genotipos de arroz para el valle cálido del Alto Magdalena (VCAM)

El VCAM se caracteriza por presentar a nivel de zona varias subregiones o microambientes que han permitido desarrollar genotipos (variedades e híbridos) de alta adaptabilidad a dichas condiciones. Dentro de ellas se destacan:

- Zona norte, centro y sur del Tolima.
- Zonas norte y centro del Huila.

Entre estas sobresalen microrregiones como el norte del Tolima, la meseta de Ibagué, Saldaña, el valle del río Neiva y Juncal, cuyas características de suelo, oferta ambiental y disponibilidad hídrica condicionan el manejo agronómico, especialmente el ajuste de las tasas y método de siembra. Además, plantean un reto importante al momento de producir genotipos de mayor adaptabilidad

con un comportamiento diferencial. Y aún más, genotipos que presenten una alta plasticidad fenotípica que permita una adaptación a múltiples zonas.

Con el fin de suplir esta demanda, se han estado desarrollando programas de mejoramiento genético desde hace décadas por parte de instituciones del orden internacional y nacional, como son:

- Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR).
- International Rice Research Institute (IRRI).
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Federación Nacional de Arroceros de Colombia (Fedearroz).

Junto a ellas, han participado varias empresas del sector privado que se dedican a la multiplicación y comercialización de semillas de genotipos de arroz con atributos de alta adaptabilidad, mayor rendimiento y baja susceptibilidad a plagas y enfermedades. Sumado a ello, en los últimos años ha cobrado relevancia el desarrollo de materiales tolerantes al déficit hídrico y a las imidazolinonas (Clearfield®). Al respecto, se debe destacar que el mayor porcentaje de área cultivada en la región se encuentra establecida con genotipos de arroz riego, en los cuales sobresalen variedades convencionales y, en menor proporción, genotipos híbridos que son más eficientes en el uso del agua. En la tabla 3.2 se relacionan los principales rasgos o atributos deseados en los genotipos de arroz para el VCAM.

Tabla 3.2. Principales rasgos o atributos deseados en los genotipos de arroz para el VCAM

Característica	Nivel empleado o aceptado
Tasa de siembra variedad	Surcos: 100 a 150 kg ha^{-1}
	Voleo: 150 a 180 kg ha^{-1}
	Trasplante: 40 a 50 kg ha^{-1}
Tasa de siembra híbrido	35 a 50 kg ha^{-1}

Continúa

Continuación

Característica	Nivel empleado o aceptado
Días a cosecha	Medio (100 a 125)
	Tardía (130 - 136)
Longitud de planta	Media - alta
Potencial de macollamiento	Medio - alto
Número de panículas/m²	500 - 600
Volcamiento (%)	Bajo
Vaneamiento (%)	Bajo
Tipo de grano	Medio - largo
Susceptibilidad a plagas y enfermedades	Baja
Rendimiento de trilla (%)	50 - 65
Grano partido (%)	< 40 %
Centro blanco (%)	> 60 %
Grano yesado (%)	< 5 %
Contenido de amilosa (%)	Intermedio (20 - 25 %) y alto (> 25 %)
Rendimiento	6,5 a 9 t ha^{-1}
Cosecha	Mecanizada

Fuente: Adaptado de Pereyra y Cambra (2018), Hernández et al. (2021), Magro (2023), Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2023a) y Fedearroz (2024).

Es importante resaltar la importancia que tiene usar semilla certificada con el fin de garantizar estas características varietales, especialmente la tolerancia a factores bióticos, pues esto incide en el óptimo desarrollo de los cultivares.

Al respecto, se ha determinado que el uso de semillas certificadas aumenta el rendimiento hasta en 40 %, pues la pureza genética asegura una mayor germinación, vigor y uniformidad del cultivo (ICA, 2023b). No obstante, existe una baja adopción de esta práctica: por ejemplo, en los años 2020 y 2021 se alcanzaron unos porcentajes de entre el 47 % y 36 %, respectivamente (Acosemillas, 2021). En ese sentido, se hace imperativo que las instituciones promuevan esta práctica, especialmente Fedearroz, que es responsable del desarrollo tecnológico del sector arrocero en Colombia.

Finalmente, la tabla 3.3 presenta un resumen de algunos materiales de arroz disponibles en el mercado para el establecimiento de cultivos en el VCAM, así como algunas características relevantes para cada cultivar. Cabe mencionar que si bien para la región del VCAM existe una amplia variedad de materiales que se pueden utilizar con base en las condiciones específicas de cada localidad y la oferta edafoclimática de cada subregión, no sobra especificar que para garantizar un rendimiento cercano al potencial se debe utilizar semilla certificada.

Tabla 3.3. Resumen de los principales cultivares de arroz utilizados en el VCAM

Genotipo	Característica del material	Ciclo de vida (DDE)	Región recomendada
F-67	• Alto potencial de rendimiento. • Susceptible al añublo del arroz en hoja y cuello de la panícula.	110-125	Subregiones naturales de los valles interandinos, Caribe y Orinoquia.
F-68	• Alto potencial de rendimiento. • Buena adaptación a condiciones de secano y baja radiación.	98-110	Subregiones naturales de los valles interandinos, Caribe y Orinoquia.
F-2000	• Bajo vaneamiento y presenta estabilidad en el rendimiento. • Es tolerante al virus de la hoja blanca. • Alta susceptibilidad al añublo del arroz en hoja y cuello de la panícula.	110-125	Subregiones naturales de los valles interandinos, Caribe y Orinoquia.

Continúa

Continuación

Genotipo	Característica del material	Ciclo de vida (DDE)	Región recomendada
F-2020	• Alto potencial y estabilidad en el rendimiento.	103-115	Subregiones naturales de los valles interandinos y Caribe.
F-70	• Rendimientos competitivos. • Granos aristados en la parte superior de la panícula, pero se parten en la cosecha y no generan limitantes en molinería.	105-115	Subregiones naturales de los valles interandinos, Caribe y Orinoquia.
F-75	• Alto potencial de rendimiento. • Granos aristados en la parte superior de la panícula, pero se parten en la cosecha y no generan limitantes en molinería.	110-120	Subregiones naturales de los valles interandinos, Caribe y Orinoquia.
F-Gualanday	• Alto potencial de rendimiento. • Ha registrado buen comportamiento en ambos semestres, como rasgo de estabilidad y adaptabilidad.	110-135	Subregiones naturales de los valles interandinos y Caribe.
F-Ibis CI	• Material desarrollado para el sistema de producción Clearfield®, con el objetivo de controlar arroz maleza.	105-118	Subregiones naturales de los valles interandinos y Orinoquia.
Cálida 22	• Alto potencial de rendimiento. • Tolerante a *Pyricularia g.*, *Cercospora o.* y *Rhizoctonia s.*	107-123	Zonas cálidas (< 500 m s. n. m.)
Maja 6	• Rendimientos estables. • Presenta tolerancia a *Pyricularia* en hojas y en cuello, moderada susceptibilidad al virus de hoja blanca.	107-120	NE
Oryzica 1	• Material de arroz con excelente calidad de molinería y de cocción, considerada como una variedad premium ideal para cocina gourmet.	107-120	Denominación de origen en la meseta de Ibagué.
Panorama 394	• Alto potencial de rendimiento y excelente calidad de grano (considerado material premium).	103-125	Zonas arroceras de valles interandinos, Llanos Orientales y región Caribe.

NE: No especifica.

Fuente: Adaptado de Ospina-Gómez et al. (2024) y de Semillas de Arroz Pajonales (2024).



4

Manejo agronómico

Sofiane **Ouazaa**
Nesrine **Chaali**
José Isidro **Beltrán-Medina**
Kemis Lisset **Sierra-Martínez**
John Edinson **Calderón-Carvajal**
Alefsi David **Sánchez-Reinoso**
Camilo Ignacio **Jaramillo-Barrios**

Introducción

En este capítulo, el lector explorará un análisis integral del manejo agronómico del cultivo de arroz en el VCAM. En primer lugar, se examinan los sistemas de producción predominantes en la región, como la siembra directa y el trasplante, y se describen tecnologías para optimizar la eficiencia productiva. Posteriormente, se analizan los sistemas de riego y las estrategias de gestión hídrica, esenciales para hacer un uso eficiente del agua en función de las necesidades del cultivo. Además, se profundiza en el manejo de arvenses, presentando estrategias culturales, mecánicas y químicas, así como el empleo de genotipos resistentes, para reducir la competencia y maximizar el rendimiento del cultivo. Finalmente, el capítulo aborda prácticas de nutrición y control de plagas, orientadas a mejorar la salud y la sostenibilidad del sistema productivo en la región, con lo cual se contribuye al desarrollo de una agricultura más eficiente y adaptativa.

Sistemas de producción de arroz en el VCAM

Los sistemas de producción de arroz en el VCAM presentan una variación en la intensidad de producción en algunas zonas o microrregiones, que está determinada principalmente por la capacidad de suministro del recurso hídrico y por la topografía de los suelos. Dentro de estos sistemas se incluyen aquellos en los que el arroz se cultiva como monocultivo o como cultivo principal dentro de un sistema de rotación, los cuales se describen a continuación.

Sistemas de producción rotacional y monocultivo

El cultivo de arroz en el VCAM presenta diferencias en la dinámica de producción, puesto que en algunas zonas se siembra como monocultivo, mientras que en otras se realiza la práctica rotacional de cultivos, condición que se presenta principalmente en las zonas norte y centro de los departamentos del Huila y Tolima.

Al respecto se debe destacar que dentro del sistema rotacional predomina el cultivo de arroz en alternancia con los cultivos de maíz y algodón, principalmente (Ouazaa et al., 2022). Esta práctica, además de reducir el requerimiento hídrico en los campos, mejora el control fitosanitario porque rompe los ciclos biológicos de plagas, malezas y enfermedades (Ávila, 2000; Feng et al., 2017). Adicionalmente, disminuye la degradación del suelo ocasionada por la inundación continua (Franco, 1996). Por otra parte, se ha demostrado que los procesos de rotación de gramíneas y oleaginosas a largo plazo generan cambios significativos en la fertilidad potencial y efectiva (Lizcano et al., 2022), de tal manera que permite recuperar la fertilidad del suelo y generar rendimientos estables, lo cual contrarresta los impactos negativos del monocultivo (Díaz et al., 2009).

Como se ha mencionado, el sistema de monocultivo presenta algunos efectos nocivos, tales como la salinización progresiva, la disminución de la fertilidad natural y la alteración de las poblaciones de microorganismos benéficos del suelo, lo cual provoca la disminución del rendimiento de los cultivos (Fernández, 2016; Saboya, 2021; Vélez, 1995). Sin embargo, son desafíos a los que se enfrentan algunos productores de las subzonas de los municipios de Ambalema, Saldaña, Purificación, Aipe y Palermo, pues debido a la condición topográfica de los suelos, se forman napas freáticas en el nivel superior que generan una condición de saturación constante, lo cual permite que los agricultores adecúen los lotes como piscinas de producción de arroz, pero en muchos casos reduce la posibilidad de desarrollar otro tipo de cultivos transitorios. De igual forma, los sistemas de producción de arroz en monocultivo están influidos por la dinámica del mercado, el cual favorece su siembra porque tiene mayores precios de venta y rentabilidad en comparación con otros cereales u oleaginosas (Bustos, 2012; Saboya, 2021).

Finalmente, se destaca que en ambos sistemas se emplean los métodos de siembra directa mecanizada y el trasplante manual y mecanizado que se describen en los siguientes apartados.

Método de siembra directa mecanizada

En el departamento del Tolima predomina este sistema de siembra en los municipios del centro y sur, como Ibagué, Piedras, El Espinal, Guamo, Saldaña, Purificación y Prado, así como en el norte, en Venadillo, Lérida, Ambalema, Armero y Guayabal (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] & Federación Nacional de Arroceros de Colombia [Fedearroz], 2017).

La siembra se realiza utilizando una sembradora de surcos arrastrada por un tractor, lo cual permite depositar las semillas de manera continua y ajustada a la distancia requerida entre surcos, que puede variar de 15 cm a 30 cm, dependiendo del tipo de sembradora empleada (Tinoco & Acuña, 2009) (figura 4.1). Sin embargo, el estándar para el VCAM es una distancia entre surcos de 17 cm. En este sentido, antes de iniciar el proceso de siembra es crucial calibrar la sembradora para asegurar una tasa de siembra adecuada a las recomendaciones establecidas para el genotipo, así como también a una profundidad que no exceda los 3 cm o 4 cm, con el fin de garantizar una emergencia uniforme (Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria [DICTA], 2006).



Continúa Figura 4.1

Continuación



Figura 4.1. Siembra directa mecanizada. **a.** Vista posterior de la sembradora directa de arroz; **b.** Vista frontal con primeros surcos sembrados.
Fotos: José Isidro Beltrán-Medina.

Preparación del suelo y adecuación del lote

La labranza primaria comprende un conjunto de labores de preparación del suelo que tienen como objetivo aflojar, voltear y acondicionar la tierra, incorporando los residuos de cosecha para su descomposición (Jaramillo, 2002). Los principales objetivos de esta etapa son reducir la compactación, eliminar material vegetal grande y redistribuir los agregados del suelo (Jaramillo, 2002). En suelos con alto grado de compactación, se emplean implementos como el arado de cincel vibratorio o la rastra excéntrica (Navas, 2018). Sin embargo, para conservar la salud del suelo, muchos agricultores han adoptado prácticas de labranza mínima, utilizando principalmente rastras y rastrillos en la preparación del terreno, generalmente realizando un solo pase de rastra como preparación primaria (Jaramillo, 2002; Medrano & Contreras, 2023).

Posteriormente, se lleva a cabo la adecuación del lote para proporcionar a las plantas condiciones óptimas de desarrollo, para lo cual se utilizan implementos de labranza secundaria como el rastrillo pulidor, con el que se realizan dos pases para desintegrar los terrones grandes (Jaramillo, 2002). Luego se nivela la superficie utilizando una pala niveladora o microniveladora multicuchillas

"Land plane" para lograr una distribución más uniforme del agua (Garcés, 2009). Finalmente, se construyen los caballones para dividir el lote en melgas o piscinas, lo cual facilita la distribución y el almacenamiento del agua. Para esta labor se emplea el caballoneador o taipa, que puede ser de dos puentes y contar con 3, 4 o 5 discos, según las necesidades del terreno (figura 4.2) (Fedearroz, 2018).



Figura 4.2. Construcción de caballones con taipa.
Foto: José Isidro Beltrán-Medina.

Métodos de siembra por trasplante

Esta práctica predomina tanto en el sur del Tolima, como en el norte y centro del Huila. En este método de siembra indirecto, se trasplantan plántulas al campo definitivo que previamente se han desarrollado en un semillero de piscina o en bandejas germinadoras para formar un tapete de plántulas. Para cualquiera de estas condiciones es recomendable retirar las plántulas con mucho cuidado para evitar daños en el follaje y las raíces (SAG, 2006).

En particular, este método permite reducir hasta 80 % la cantidad de semilla empleada en comparación con el método de siembra directa mecanizada (Moreira, 2018). Asimismo, disminuye la tasa de consumo de agua de riego porque en los primeros días las plántulas crecen en semilleros en un ambiente semicontrolado (Cereal Systems Initiative for South Asia [CSISA], 2011).

Selección y preparación del sustrato y bandejas germinadoras

Para preparar las bandejas es fundamental seleccionar un sustrato que posea propiedades físicas y químicas apropiadas que no solo favorezcan el desarrollo radicular y aéreo de la plántula, sino que también proporcionen un soporte óptimo de anclaje. En el municipio de Saldaña, Fedearroz ha empleado una mezcla de sedimento (limo) tamizado proveniente de los canales de riego que presenta una textura liviana (franco-arenosa) y cascarilla de arroz quemada al 70 % en una proporción 2:1 (Moreira, 2018).

Las bandejas de germinación pueden prepararse de forma manual o mecánica utilizando una línea semillera, pues este equipo permite ajustar la tasa de siembra, la cantidad de sustrato y la cantidad de agua necesaria para humedecer adecuadamente el sustrato (figura 4.3). Es fundamental asegurarse de que el sustrato esté seco y que se le haya realizado un tamizado para eliminar elementos indeseados, como rocas o residuos orgánicos que podrían obstruir la descarga del sustrato en la línea semillera o, en el caso del trasplante mecanizado, afectar las agujas que depositan las plántulas en el suelo (Moreira, 2018).



Continúa Figura 4.3

Continuación



Figura 4.3. Semillero para sistema de siembra por trasplante. **a.** Preparación y acondicionamiento del semillero; **b.** Plántulas desarrolladas listas para trasplante.
Fotos: Kemis Lisset Sierra-Martínez.

La longitud óptima de las plántulas para el proceso de trasplante es de aproximadamente 15 cm, aunque esta puede cambiar según la variedad. Sin embargo, el criterio más determinante para definir el momento óptimo es el número de hojas, que debe ser de entre 3 y 5 (Álvarez, 2011).

La preparación del terreno es un factor clave para el éxito del trasplante. Generalmente, el suelo se prepara sin modificaciones significativas respecto a las prácticas recomendadas para el sistema convencional y ajustándose a las pautas definidas a partir del análisis físico de suelos. Una vez que el suelo cuenta con las condiciones óptimas, se opta por la preparación en seco, evitando el fangueo, y se lleva a cabo mediante pases de rastra para incorporar los rastrojos de la cosecha anterior (Álvarez, 2011; Moreira, 2018). Posteriormente, se realiza la nivelación del terreno para lograr una mayor uniformidad en la distribución del agua y se construyen caballones que dividen el

lote en melgas o piscinas (Fedearroz, 2018). A continuación, se efectúa un moje para favorecer la germinación y contribuir al agotamiento de los restos orgánicos, con lo cual se crea un ambiente propicio para el establecimiento de las nuevas plantas. Finalmente, se aplica agua para conseguir la consistencia adecuada del terreno y, por lo tanto, facilitar el proceso de trasplante del cultivo (Álvarez, 2011; Moreira, 2018).

Una vez que las plántulas cumplan con las características óptimas señaladas anteriormente, se procederá a realizar el trasplante, que puede llevarse a cabo de dos maneras:

1. **Trasplante manual:** este proceso inicia con el marcado del terreno de acuerdo con la distancia de siembra previamente establecida, que puede ser de 25 cm x 25 cm o de 30 cm x 30 cm dependiendo del genotipo, con una distribución en cuadrículas para facilitar el control de las malezas y asegurar un buen desarrollo del cultivo. Para este procedimiento se pueden utilizar cuerdas, tubos o piezas de madera debidamente identificadas o marcadas con la distancia correspondiente. Finalmente, se deben ubicar entre dos y tres plantas por sitio de siembra con el fin de asegurar que al menos una de las plantas una de las plantas quede establecida (Moreira, 2018).
2. **Trasplante mecánico:** es el proceso de trasplantar en campo plántulas que han sido cultivadas en bandejas. Este sistema, en el que se utilizan trasplantadoras mecánicas o autopropulsadas, asegura una siembra uniforme, con una distancia entre plantas y surcos exactos en todo el lote, lo cual garantiza una mejor captación de la radiación solar y un crecimiento uniforme del cultivo (CSISA, 2011).

Para el trasplante se suministra el tapete de plántulas a la plataforma del apero de la máquina trasplantadora. Las agujas del sistema de siembra toman porciones del tapete de manera consecutiva (2 o 3 plantas), comenzando desde el borde inferior del tapete, y las trasplantan al terreno definitivo según el distanciamiento seleccionado, que es ajustable de 18 cm a 24 cm entre cada plántula, y con una distancia fija de 30 cm entre surcos (Álvarez, 2011) (figura 4.4).





Figura 4.4. Trasplante mecanizado en cultivo de arroz. **a.** Máquina trasplantadora cargando plántulas de arroz; **b.** Proceso de trasplante mecanizado en campo inundado.

Fotos: Kemis Lisset Sierra-Martínez.

Manejo del recurso hídrico en el cultivo de arroz

El manejo del recurso hídrico se ha convertido en una de las acciones más importantes en el cultivo de arroz, pues su implementación de manera responsable garantiza la productividad del cultivo y promueve la sostenibilidad ambiental en escenarios de cambio y variabilidad climática. Este apartado analiza las estrategias y tecnologías disponibles para optimizar el uso del agua en el cultivo de arroz, con el fin de reducir el consumo sin afectar el rendimiento.

Consumo y productividad hídrica

La adecuada provisión del agua de riego es uno de los factores más importantes en la producción de arroz. En muchas regiones de Colombia, las plantas de arroz sufren tanto por exceso como por déficit de agua debido a la irregularidad de las precipitaciones y a los patrones del paisaje. La gestión del agua implica controlar este recurso para lograr un rendimiento óptimo del cultivo y el mejor uso de una provisión limitada de agua (Ouazaa et al., 2022). La correcta gestión del agua y de los sistemas de riego, especialmente de aquellos que dependen de agua almacenada, permite asegurar el suministro durante la temporada seca, cuando los rendimientos suelen ser altos debido a la elevada radiación solar y a una mayor respuesta al nitrógeno de los fertilizantes.

Como se ha indicado en otros capítulos, el cultivo de arroz requiere una gran cantidad de agua después de la siembra o el trasplante. Aunque la duración del cultivo desde la siembra o el trasplante hasta su madurez es generalmente de 90 a 120 días, en variedades de maduración temprana esta duración se reduce en 10 a 20 días. Ahora bien, la cantidad de agua requerida en el campo depende de la profundidad del agua mantenida, las prácticas de manejo del recurso, los tipos de suelo y la demanda evaporativa.

Específicamente, el arroz bajo sistema de riego en Colombia representa el 64,7 % de la demanda de agua de los cultivos transitorios, con una huella hídrica azul de 564,3 Mm^3/año y una huella hídrica verde de 1.772,86 Mm^3/año (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019). La demanda de agua anual del arroz bajo sistema tradicional es de 34,12 Mm^3, de la cual 22,17 Mm^3 es consumida de forma efectiva por el cultivo. En el arroz mecanizado la demanda de agua anual es de 1.438,78 Mm^3 y el consumo efectivo es de 935,21 Mm^3. Esta diferencia entre los dos sistemas de producción radica en que el arroz mecanizado cuenta con un área sembrada significativamente mayor (IDEAM, 2019). El arroz riego produce un promedio de 6,6 t/ha, en comparación con 4,9 t/ha para el arroz secano, lo cual subraya la importancia del riego en este cultivo (Fedearroz, 2023).

De acuerdo con información proporcionada por Fedearroz y los principales distritos de riego del Tolima, se estima que la demanda hídrica del cultivo de arroz en zonas inundables se encuentra entre 16.000 y 30.000 m^3/ha/ciclo de cultivo (González & Alonso, 2016). Sin embargo, con el modelo AquaCrop se pudo predecir que la lámina de riego neta óptima se encuentra entre 4.800 y 6.000 m^3/ha/ciclo de cultivo (Cortés, 2013), lo cual evidencia que se están aplicando volúmenes de agua superiores a las necesidades hídricas del cultivo.

La alta aplicación de agua asociada con el cultivo de arroz se atribuye a prácticas agrícolas inadecuadas y al uso ineficiente del agua a través del riego en cuencas utilizando el método de riego por melgas. No obstante, se debe tener en cuenta que implementar técnicas de riego de alta presión en esta región es muy desafiante, ya que el 70 % de los agricultores son pequeños productores que carecen de los medios financieros para adoptar tecnologías avanzadas de riego. Dado que el riego del arroz mediante distribución en melgas requiere campos inclinados y suministro de agua desde el arrozal superior, este método resulta en pérdidas de agua debido al escurrimiento y la percolación, ya que el arrozal superior debe ser llenado de agua para pasar al arrozal inferior. Además, la distribución en melgas requiere mano de obra para monitorear y acondicionar el campo para la distribución del agua.

No obstante, en el departamento del Tolima el sistema de cultivo predominante consiste en una rotación de cultivos de arroz-algodón-maíz (Ouazaa et al., 2022), que se siembra directamente. Esta práctica es obligatoria para el distrito de riego Usocoello para mitigar el alto consumo de agua asociado con el cultivo continuo de arroz, que es menor en el algodón y el maíz.

En cuanto a la producción de arroz en el Huila, se debe señalar que esta depende en gran medida de los distritos de riego que abastecen de agua las áreas de cultivo. Los principales distritos de riego en el departamento son el distrito de riego El Juncal, el distrito de riego Aipe y el distrito de riego Tesalia-Paicol. Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2023), la eficiencia de los sistemas de riego en estos distritos puede variar entre el 40 % y el 60 %, dependiendo del tipo de infraestructura y del método de riego empleado. Esta eficiencia relativamente baja subraya la importancia de modernizar los sistemas de riego para optimizar el uso del agua y mejorar la sostenibilidad del cultivo en una región con una alta demanda hídrica y recursos limitados.

Ahora bien, la evaporación media anual en el Huila alcanza niveles altos debido a la temperatura, la exposición solar y la baja humedad relativa, lo cual aumenta el consumo hídrico del arroz en comparación con otras zonas. Según el IDEAM (2021), en los meses de mayor temperatura, la tasa de evaporación en el Huila puede oscilar entre 5 mm y 6 mm diarios, lo cual exige un aporte hídrico constante para mantener la lámina de agua en el campo de arroz.

Estas condiciones contribuyen a que haya un mayor consumo y subraya la necesidad de contar con prácticas de riego más eficientes y adaptadas a estas condiciones. Datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2019) sugieren que, en condiciones de manejo tradicional, el cultivo de arroz puede consumir hasta 20.000 m^3/ha/ciclo, mientras que el uso de técnicas de riego intermitente o secado alternativo ha mostrado reducir el consumo entre el 15 % y el 30 %, de tal manera que los requerimientos disminuyen a 10.000-13.000 m^3/ha/ciclo en regiones con características similares a

las del Huila (FAO, 2019). Además, este método reduce el tiempo de inundación en ciertas etapas del cultivo y permite la oxigenación del suelo, lo cual disminuye la pérdida de agua y mejora la salud del suelo.

En este sentido, implementar métodos de riego tecnificados y controlados, como el riego intermitente o el riego automatizado por sensores, podría reducir el consumo entre 20 % y 40 % sin afectar los rendimientos (Bouman et al., 2007). Esta adaptación tecnológica en el Huila permitiría hacer una gestión hídrica más sostenible y, por lo tanto, garantizar que se haga un uso racional del recurso en un contexto donde el agua es cada vez más limitada y su demanda aumenta debido al crecimiento de la producción agrícola.

Relación agua - planta - suelo - ambiente *continuum*

Es clave entender el ecosistema agrícola del cultivo de arroz para hacer un uso eficiente y correcto del riego (figura 4.5). Desde el punto de vista agrícola, para hacerlo es necesario analizar las interacciones entre el suelo, la planta y la atmósfera, considerando que entre estos elementos se produce un flujo constante de energía y masa. El flujo de energía en este *continuum* comienza con la energía electromagnética proveniente del sol, la cual se transforma en energía disponible en los enlaces carbono-carbono de los tejidos vegetales a través del proceso de fotosíntesis (Jones et al., 2002).

Durante el proceso de fotosíntesis, aproximadamente el 50 % de la energía solar es utilizada, pero solo el 2 % de la energía incidente es efectivamente absorbida por los tejidos de las plantas, pues el restante 98 % se emplea en la regulación de la temperatura (calor sensible) y la transpiración (calor latente). Esto subraya la importancia que tiene para las plantas usar con eficiencia la energía solar y cómo el manejo adecuado del agua puede influir en este balance energético (Monteith, 1972).

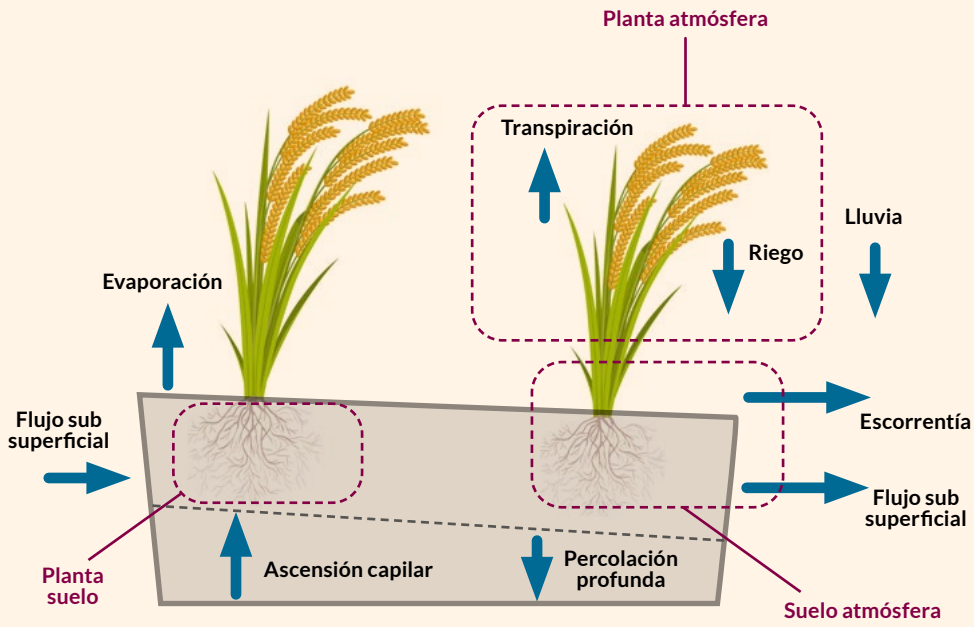


Figura 4.5. Balance de agua en el suelo de la zona radicular de una planta de arroz.
Fuente: Adaptada de FAO (2006).

Las relaciones directas entre los componentes del ecosistema agrícola están gobernadas por el flujo de energía y materia, específicamente el agua. Por esta razón, la calidad del suelo, su capacidad de retención de agua y su estructura física desempeñan papeles cruciales en la eficiencia del riego y en la salud general de los cultivos. En la agricultura tradicional, el suelo es la principal fuente de alimentación para los cultivos, por lo cual es el factor clave que se debe tener en cuenta al establecer un sistema de riego eficiente (Brady & Weil,2008).



Ahora bien, hacer un manejo adecuado del riego implica conocer no solo las necesidades hídricas del cultivo de arroz, sino también cómo estas necesidades varían en función de las condiciones climáticas y del estado del suelo. Técnicas modernas como el uso de sensores de humedad del suelo y la implementación de tecnologías de riego inteligente pueden optimizar el uso del agua, con lo cual se reduciría el desperdicio y mejoraría la eficiencia en el suministro de agua a los cultivos (Fereres & Soriano, 2007).

En resumen, para implementar un riego efectivo en el cultivo de arroz es indispensable entender cómo interactúan el suelo, la planta y la atmósfera, además de conocer cómo se distribuye y utiliza la energía solar en estos procesos. Tal comprensión permitirá diseñar sistemas de riego que optimicen el uso del agua y contribuyan al desarrollo sostenible de la agricultura. La integración de conocimientos científicos y tecnologías avanzadas en el manejo del riego puede llevar a prácticas agrícolas más sostenibles y productivas que beneficiarían tanto a los agricultores como al medioambiente.

Sistemas de riego para el cultivo de arroz en el VCAM

En el VCAM se han implementado diferentes métodos de riego para aumentar la precisión en el suministro de riego en el cultivo de arroz, los cuales han tenido en cuenta las condiciones hídricas del suelo y los requerimientos de la planta para reducir el consumo excesivo.

Aunque el riego convencional de distribución por gravedad es el método más empleado en el VCAM, La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA ha implementado el riego mediante alternancia entre humedad y secado (*alternate wetting and drying*, AWD) y el riego por múltiples entradas de agua (*multiple inlet rice irrigation*, MIRI) (González & Alonso, 2016; Price et al., 2013; Vories et al., 2005).

Riego por gravedad

El riego por gravedad o por inundación requiere que se haga un levantamiento topográfico para construir diques o caballones a curvas de nivel para distribuir el agua (González & Alonso, 2016). Por lo general, en esta técnica se distribuye el agua por una única entrada en la parte superior del lote, de manera que un operario regador especializado debe adecuar constantemente el lote para hacer que el agua avance hasta la parte baja. Como se mencionó en apartados anteriores, en el punto de entrada al lote se generan grandes pérdidas por percolación, teniendo en cuenta que el suelo ya está saturado y sigue entrando agua (figura 4.6).



Figura 4.6. Riego tradicional que consiste en la inundación de melgas por gravedad.
Foto: John Edinson Calderón-Carvajal.

Este método consume grandes volúmenes porque mantiene una lámina de agua continua durante gran parte del ciclo productivo. Es un sistema poco tecnificado, poco eficiente, con baja uniformidad, que presenta grandes pérdidas de agua por infiltración y escorrentía. Es importante agregar que además del impacto ecológico negativo que genera este método de riego debido al incremento en la presión sobre las fuentes hídricas y el deterioro de la calidad del agua (Campos et al., 2010; Fernández et al., 2012), también contribuye a aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano, por la descomposición microbial de la materia orgánica que sucede en condiciones de inundación continua (Kumar et al., 2019).

Riego alternando moje y secado (AWD)

El método AWD combina las ventajas del cultivo tanto en condiciones anaeróbicas como aeróbicas, pues consiste en realizar ciclos de humedad/secado que inician 15 días después del trasplante y se llevan a cabo hasta la floración. Estos ciclos consisten en inundar el terreno y dejarlo secar hasta cierto nivel por debajo de la superficie del suelo, luego de lo cual se vuelve a inundar y el ciclo inicia nuevamente (Carrijo et al., 2017; Price et al., 2013). La duración del ciclo depende de las condiciones ambientales, las características del suelo y el tamaño de las plantas (Lampayan et al., 2015; Price et al., 2013).

Existen tres tipos de AWD de acuerdo con el nivel al que se deja secar el suelo: el AWD leve o seguro, donde el nivel del agua por debajo del nivel del suelo no baja más de 15 cm; el AWD moderado, donde el nivel del agua llega hasta los 25 cm y el AWD severo, donde el nivel del agua llega hasta los 30 cm (Lampayan et al., 2015). Este método reduce el uso del agua hasta el 35 % y, dependiendo de las condiciones, principalmente del suelo, puede llevar a mantener el rendimiento, incrementarlo 10 % o generar ligeras reducciones (Price et al., 2013).

Una de las formas sencillas y económicas para monitorear el nivel del agua en el terreno consiste en elegir un área representativa de la parcela y enterrar un tubo de PVC, con un diámetro de 7 cm a 15 cm y una longitud de 40 cm, a una profundidad mayor a 20 cm (figura 4.7). La parte del tubo que será enterrada en el suelo debe contar con orificios que permitan el flujo del agua entre el suelo que está alrededor y el interior del tubo (Heros et al., 2022).

El monitoreo de la lámina de agua de riego se realiza mediante la lectura del nivel del agua en el tubo perforado. Esta lectura se puede hacer de forma manual con una regla graduada o a través de un sensor ultrasónico conectado a un *datalogger*, el cual registra los datos a una frecuencia previamente establecida para hacer un control preciso del riego (figura 4.8).



Figura 4.7. Vista superior de un tubo perforado de 4" instalado en el lote.
Foto: John Edinson Calderón-Carvajal.





Figura 4.8. a. Tubo con medición manual mediante regla graduada; b. Tubo equipado con sensor ultrasónico.
Fotos: John Edinson Calderón-Carvajal.

Riego por múltiples entradas (MIRI)

El MIRI es un sistema de conducción de baja presión que consiste en disponer una manguera a través del terreno de siembra en forma perpendicular a los caballones por la cota más alta del lote. Específicamente, se emplea una manguera de polietileno de baja densidad de 6" a 18" de diámetro con perforaciones y compuertas regulables que permiten aplicar agua en cada una de las melgas de forma independiente y simultánea, sin esperar a que la parte superior del lote se inunde para que el agua pase por gravedad de una melga a otra, lo cual permite restablecer la humedad de una melga en un menor tiempo (Massey et al., 2014; Massey et al., 2018; Vories et al., 2005).

Con esta técnica se mantiene la humedad uniforme en todo el terreno y se reduce la pérdida de agua por percolación en los surcos superiores donde se inicia la inundación (Massey et al., 2014; Massey et al., 2018). Esta técnica permite reducir 24 % el volumen de agua aplicado y aumenta el rendimiento en 3 % (Vories et al., 2005). En Colombia, el uso de la técnica MIRI ha permitido disminuir 30 % el consumo del agua, adicional a la reducción que se ha obtenido con la implementación de las prácticas del programa Adopción Masiva de Tecnología (AMTEC) desarrollado por Fedearroz (Guzmán et al., 2020).

El MIRI se puede implementar como un riego de precisión cuando se involucran tecnologías como drones, sensores y análisis de datos para regar solo aquellas áreas que lo necesitan, con lo cual se reduce significativamente el desperdicio de agua y mejora la eficiencia general del sistema (figura 4.9).

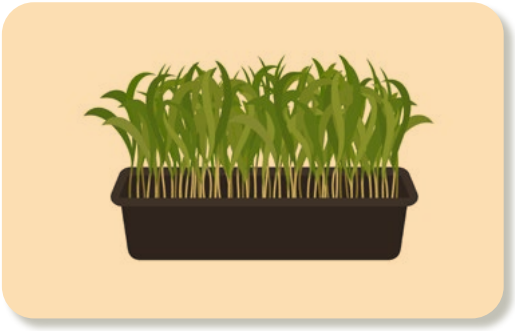




Figura 4.9. Aplicación de riego por múltiples entradas (MIRI) en lote de arroz. **a.** Manguera de polietileno de baja densidad de 6" a 18" de diámetro con perforaciones y compuertas regulables; **b.** Ventanilla de control para la salida del agua. Fotos: John Edinson Calderón-Carvajal.

Productividad hídrica del arroz con las tres técnicas de riego

Para evaluar el consumo de agua de las tres técnicas de riego se realizaron dos ciclos de cultivo de arroz en condiciones experimentales en el Centro de Investigación Nataima de AGROSAVIA (Espinal, Tolima) en 2021 y 2022. Específicamente, se utilizaron canaletas tipo Parshall y un sensor ultrasónico con el fin de determinar el caudal de entrada y cuantificar la lámina de agua aplicada (figura 4.10). Cabe destacar que esta tecnología permite monitorear el consumo de agua sin que el técnico esté presente en el sitio de producción porque el sensor envía la información de forma inalámbrica a una estación conectada a internet, lo cual permite acceder a los datos desde cualquier parte.



Continúa

Continuación

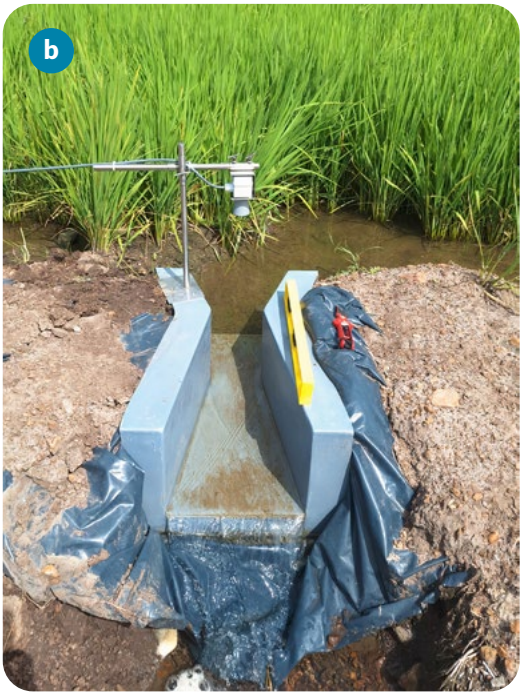


Figura 4.10. Instrumentos para evaluar el consumo de agua de los tres sistemas de riego analizados. **a.** Canaleta tipo Parshall; **b.** Sensor ultrasónico para determinar el caudal de riego.

Fotos: John Edinson Calderón-Carvajal.

Después de los análisis se determinó que la técnica de riego convencional aplicó mayor cantidad de agua que el MIRI y el AWD, en los cuales se observaron reducciones de entre el 34 % y el 54 % (tabla 4.1). Respecto a los eventos de riego (cada ocasión en que se suministra agua al cultivo durante el ciclo), no se observó que tuvieran relación con la técnica de riego usada. La cantidad de riego aplicada en el ciclo 2022 fue menor en comparación con el ciclo 2021, lo cual se asoció con una mayor precipitación y una mejor distribución de las lluvias a lo largo del ciclo de cultivo en el 2022. Al respecto se debe señalar que en el ciclo 2021 se registraron días de lluvia con valores de hasta 113 mm, lo cual se puede asociar con los efectos de la variabilidad climática y la ocurrencia de eventos climáticos extremos. Por otro lado, en temporada seca es común que los productores no puedan regar la totalidad de su lote en

la ventana de tiempo que les da el distrito de riego y deban priorizar la zona que van a regar. En este sentido, las técnicas MIRI y AWD les permiten hacer una mejor programación del riego y una aplicación más rápida y eficiente en sus lotes. Incluso tienen la posibilidad de ampliar el área sembrada con un consumo de agua menor al riego convencional.

Tabla 4.1. Uso de agua con tres técnicas de riego durante dos ciclos de cultivo de arroz

Ciclo de cultivo	Técnica de riego	Riego aplicado		Reducción del riego (%)	Eventos de riego	Precipitación (mm)	Precipitación efectiva (mm)
		m^3/ha	mm				
2021	MIRI*	4.573	457,3	54,03	22	521,4	331,6
	AWD**	5.179	517,9	47,93	20		
	Convencional	9.948	994,8	----	23		
2022	MIRI	2.640	264,0	34,76	14	549	353,6
	AWD	2.319	213,9	42,69	9		
	Convencional	4.047	404,7	----	10		

* MIRI (*multiple inlet rice irrigation*): riego por múltiples entradas.
** AWD (*alternate wetting and drying*): riego alternando moje y secado.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el rendimiento del cultivo no se observaron diferencias entre las tres técnicas de riego, lo cual muestra que reducir la cantidad de agua aplicada gracias a una técnica más eficiente no implica un menor rendimiento en el cultivo del arroz. En consecuencia, este resultado también evidencia una menor productividad del agua con la técnica de riego convencional, pues se reduce la producción de grano por m^3 de agua en el cultivo con respecto a las otras técnicas (figura 4.11).



* La productividad del agua corresponde a kg de grano por m^3 de agua que ingresa al cultivo (irrigación + precipitación efectiva).

Figura 4.11. Rendimiento (a) y productividad (b) del agua en el cultivo de arroz usando tres técnicas de riego.

Fuente: Elaboración propia.

Las técnicas de riego MIRI y AWD permitieron reducir el consumo del agua en comparación con la técnica convencional sin afectar el rendimiento del cultivo. Además, la implementación de estas técnicas no requiere mayor infraestructura, lo cual las hace muy económicas. Cabe aclarar que aunque están por encima del riego convencional en términos de costo, al observar las ventajas en el uso eficiente del agua la inversión se justifica.

En conclusión, el uso de las técnicas MIRI y AWD generó una mejor productividad hídrica (figura 4.12), lo cual permite hacer una mejor gestión del riego para mitigar los efectos de la variabilidad climática, tener mayor estabilidad en el rendimiento de los cultivos a través del tiempo y alinear el cultivo con la necesidad mundial de producir más con menos agua.

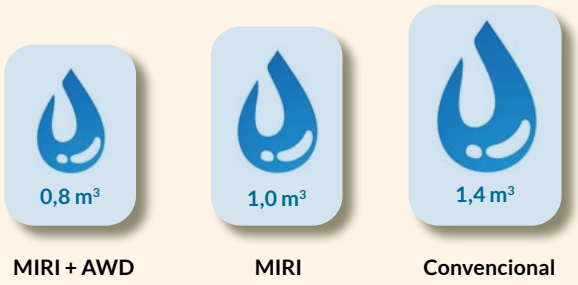


Figura 4.12. Productividad hídrica por técnica de riego. La imagen representa el volumen de agua necesario para producir un kilo de grano de arroz.
Fuente: Elaboración propia.

Programación de riego

La programación de riego es el proceso de planificar y gestionar la cantidad y frecuencia de agua aplicada al cultivo de arroz para maximizar la eficiencia del recurso y garantizar el crecimiento adecuado de las plantas. Como se ha argumentado a lo largo del libro, desarrollar un sistema de riego bien gestionado es esencial en contextos agrícolas, especialmente en el VCAM, donde la disponibilidad de agua es limitada y variable (Chaali et al., 2020).

La programación de riego en el cultivo de arroz permite definir con precisión la lámina y la frecuencia de riego adecuadas para mantener el suelo en un estado de humedad óptimo en cada una de las etapas fenológicas del cultivo (Dzomeku et al., 2023). En ese sentido, es necesario determinar el requerimiento hídrico del cultivo mediante la realización de un balance hídrico, en el cual son consideradas las entradas y salidas de agua del sistema suelo-planta-ambiente, en forma de aportes de agua provenientes de la precipitación (generalmente solo se considera la precipitación vertical) y salidas de agua del suelo y de la planta en el proceso de evapotranspiración (Evett et al., 2012). A continuación, se describen los tres aspectos claves para programar el riego en el cultivo de arroz: el suelo, la planta y el clima.

- **Tipo de suelo:** cada tipo de suelo tiene una capacidad diferente para retener y drenar agua, lo cual influye directamente en la frecuencia y cantidad de riego. En este sentido, es crucial conocer las características del suelo antes de planificar el riego (véase el capítulo 5 para conocer más detalles sobre las propiedades de los suelos arroceros).
- **Etapas de crecimiento de la planta:**
  - Germinación y establecimiento: esta etapa abarca desde la siembra hasta la emergencia de las plántulas. El objetivo es asegurar un buen establecimiento del arroz, lo cual exige garantizar un nivel adecuado de humedad en el suelo, pues en esta etapa inicial debe mantenerse húmedo, pero no saturado.
  - Plántula: en esta fase las plántulas desarrollan sus primeros brotes y se establece el crecimiento vegetativo. Es importante evitar que el campo se seque, ya que el estrés hídrico en esta etapa puede afectar el desarrollo radicular y vegetativo.
  - Macollamiento: esta etapa es clave para el desarrollo del número de macollos que el arroz producirá. Un riego adecuado es fundamental durante esta etapa, ya que determina la cantidad de espigas que se formarán. Si se usa la técnica AWD, es importante garantizar que no falte agua durante esta fase.

  - » Embuchamiento: esta es la etapa crítica en la que el arroz empieza a formar la espiga dentro del tallo, ya que un déficit hídrico puede afectar la formación de las espigas. El estrés hídrico en esta etapa puede reducir el número de granos por espiga.
  - » Floración: esta es una de las fases más sensibles al estrés hídrico, ya que ocurre la polinización y la formación de granos. Se recomienda mantener el campo inundado para evitar cualquier déficit de humedad.
  - » Llenado de grano: en esta etapa los granos de arroz se están llenando con nutrientes y agua. Es necesario mantener el campo con una lámina de agua de 5 cm a 10 cm hasta que los granos estén completamente llenos. Más adelante se puede reducir gradualmente la cantidad de agua.
  - » Maduración: los granos alcanzan la madurez y el cultivo se prepara para la cosecha, por lo cual se debe interrumpir el riego (aproximadamente 15 días antes de la cosecha) para permitir que el campo se seque. Esto facilita la recolección y asegura que el grano tenga un contenido de humedad adecuado para el trillado.

- Clima: las variables climáticas como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del viento tienen un impacto directo en las necesidades hídricas del cultivo de arroz, razón por la cual es clave monitorearlas en tiempo real mediante las estaciones agroclimáticas. Específicamente, se debe estimar la evapotranspiración del cultivo, la cual combina la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración de la planta. Se trata de un factor crucial en la programación del riego y se puede calcular usando modelos de simulación como el FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Simulación del riego

Para modelar la demanda de agua de los cultivos se pueden emplear programas de la FAO como Aquacrop y Cropwat, los cuales consideran variables del clima, el tipo de suelo y el tipo de cultivo, de manera que ayudan a los agricultores a planificar la cantidad y la frecuencia de riego con mayor precisión.

El Cropwat es un modelo agroclimático de simulación de cultivos desarrollado por la FAO que permite determinar el requerimiento hídrico de los cultivos, realizar programaciones de riego para cultivos no inundados o para arroz y estimar el rendimiento. Inicialmente, Cropwat calcula la radiación y la evapotranspiración del cultivo por el método de Penman-Monteith, a partir de los datos mensuales de temperatura mínima y máxima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación de la zona de establecimiento del cultivo (Allen et al.,1998).

Para determinar el requerimiento hídrico del cultivo y realizar la programación de riego, es necesario alimentar el modelo con datos mensuales de precipitación con el fin de obtener la precipitación efectiva (con la fórmula de la FAO o la fórmula del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA]), información del cultivo, fecha de siembra e información de propiedades hidrofísicas del suelo. El modelo cuenta con información de referencia de diferentes cultivos y suelos de acuerdo con su clase textural.

Por su parte, el Aquacrop es un modelo desarrollado por la FAO para simular el rendimiento de los principales cultivos herbáceos en función de la cantidad de agua disponible (Steduto et al., 2009). Se diseñó principalmente para evaluar el impacto que tiene el manejo del agua en los rendimientos de los cultivos, sobre todo en condiciones de escasez de agua o en suelos de baja fertilidad, de manera que es una herramienta ampliamente utilizada en la agricultura para la toma de decisiones relacionadas con el riego y la gestión hídrica.

El modelo se centra en la relación entre el uso del agua y la productividad de los cultivos. Específicamente, simula la respuesta de las plantas a diferentes niveles de agua en el suelo, lo cual permite optimizar el riego para maximizar el rendimiento. A diferencia de otros modelos agronómicos más complejos, Aquacrop es fácil de usar y requiere menos datos, lo que lo hace accesible para agricultores, planificadores y técnicos, al mismo tiempo que mantiene un alto nivel de precisión en sus predicciones. Es útil para analizar el efecto de diferentes escenarios climáticos (sequía, aumento de la temperatura o cambios en las precipitaciones) sobre el rendimiento de los cultivos, de tal forma que permite a los usuarios adaptar estrategias de manejo.

Manejo de la nutrición en el sistema productivo de arroz en el VCAM

Con el fin de garantizar una producción exitosa del cultivo es necesario definir estrategias de nutrición de acuerdo con cada etapa fenológica del arroz, de tal manera que se aporte los elementos esenciales en las cantidades adecuadas para conseguir un óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas (Salamanca-Jiménez, 2017). Con este propósito se han hecho muchos esfuerzos para realizar manejos agronómicos de los nutrientes que no solo aseguren el aumento y la sostenibilidad de la producción agrícola suministrando de forma eficiente los fertilizantes, sino que además preserven el medioambiente evitando los excesos y aplicándolos en las épocas críticas (FAO, 1999). En este sentido, es importante conocer las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, así como las características de la planta cultivada, el tipo de fertilizante, el método de aplicación, las condiciones ambientales, entre otros aspectos (Chemura, 2014; Da Silva & Carvalho, 2016; Ribeiro et al., 2016), para así hacer más eficientes los planes de nutrición.

Específicamente, se conoce que los elementos esenciales pueden estar agrupados de acuerdo con la cantidad que se debe suministrar a la planta según sus demandas nutricionales y son clasificados como macronutriente (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, boro, cloro, níquel, zinc y molibdeno) (Marschner, 2011; White & Brown, 2010). Se ha reportado que la mayor parte de la absorción de estos macronutrientes y micronutrientes, que influyen directamente sobre la productividad de los cultivos, se produce en las etapas de expansión, formación del embrión y maduración de los granos, en las cuales las deficiencias nutricionales pueden ser críticas (Dubberstein et al., 2016).

En el caso de los genotipos de arroz comúnmente empleados en el VCAM, la tabla 4.2 detalla los diferentes niveles de extracción de nutrientes por tonelada de grano cosechado. En particular, se destaca que el orden de mayor a menor requerimiento promedio de los elementos esenciales para estos genotipos es el siguiente:

N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > B > Cu.

No obstante, cabe aclarar que existe variabilidad genotípica en la demanda de algunos elementos, como sucede con el potasio, el calcio, el magnesio y el nitrógeno.

Tabla 4.2. Extracción de nutrientes de algunos genotipos comerciales para el VCAM

Genotipo	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	B	Cu
	kg t^{-1}										
F-60	21,00	4,80	20,00	4,80	3,10	3,10	0,50	0,05	0,42	0,02	0,01
F-67	23,35	1,68	18,00	4,49	1,57	2,13	0,15	0,03	1,30	0,01	0,01
F-70	20,08	3,51	24,96	4,72	1,09	2,67	0,22	0,04	0,14	0,01	0,01
F-68	22,13	4,14	27,44	5,05	1,94	4,14	0,12	0,03	0,74	0,01	0,01
F-2000	26,72	3,75	25,87	5,44	1,21	3,75	0,14	0,05	0,50	0,01	0,01
Benja 1	22,23	0,90	13,58	11,55	6,55	1,38	0,25	0,06	0,12	0,06	0,05
OR 228	19,77	1,13	5,21	8,45	6,65	1,40	0,20	0,06	0,05	0,02	0,02
Promedio	**22,18**	**2,84**	**19,29**	**6,36**	**3,16**	**2,65**	**0,23**	**0,04**	**0,47**	**0,02**	**0,02**
Máximo	26,72	4,80	27,44	11,55	6,65	4,14	0,50	0,06	1,30	0,06	0,05
Mínimo	19,77	0,90	5,21	4,49	1,09	1,38	0,12	0,03	0,05	0,01	0,01
Desviación	2,37	1,57	7,90	2,66	2,44	1,09	0,13	0,01	0,44	0,02	0,02
Coeficiente de variación	11%	55%	41%	42%	77%	41%	57%	25%	95%	96%	87%

Fuente: Adaptado de Castilla-Lozano et al. (2019) y Sánchez-Reinoso et al. (2019).

Por su parte, la tabla 4.3 muestra algunos de los fertilizantes simples y compuestos disponibles en el mercado para uso común en los planes de nutrición para los cultivos de arroz en el VCAM. Es importante señalar que el uso de ciertas fuentes de nutrientes está supeditada a la disponibilidad y valor en el mercado, ya que gran cantidad de estos insumos son importados en Colombia.

Tabla 4.3. Listado de algunos fertilizantes y su composición química disponibles para la fertilización del cultivo de arroz

Fertilizante	NO_3	NH_4	Urea	N	P_2O_5	K_2O	MgO	S	CaO	Zn	B
Urea				46							
Urea recubierta + S		5	35	40				5,6			
Sulfato de amonio (SAM)		20,5		20,5				23,5			
Di fosfato de amonio (DAP)		18		18	46						
Mono fosfato de amonio (MAP)		11		11	52						
CQ: 12-24-23-2MgO	3,2	8,8		12	24	12	2	1		0,02	0,04
Cloruro de potasio (KCl)						60					
Sulfato de potasio (SOP)						52		18			
Sulfato de potasio + magnesio						30	10	17			
CQ: 21-0-0-11(CaO)-7(MgO)	10,7	10,3		21			7,5		11		
CQ: 15-0-0-26CaO-0.3B	14,5	1,2		15,45					25,5		0,3
Sulfato de magnesio							16	13			
Quelato de zinc										12	
Kieserita							25	20			
CQ: 15-4-23+4MgO+2S+0.1B+0.1Zn	6,7	8,3		15	4	23	4	2		0,1	0,1
CQ: 17-6-18+2MgO	7,3	9,7		17	6	18	2	1,6		0,1	0,2

Continúa

Continuación

Fertilizante	NO_3	NH_4	Urea	N	P_2O_5	K_2O	MgO	S	CaO	Zn	B
CQ: 15-9-20-3.8S	6,7	0,3		15	9	20	1,8	9,5		0,02	0,015
CQ: 20-3-18-3MgO-2S-0.1Zn-0.1B	7,95	12,05		20	4	18	3				
CQ: 15-9-20	6	9		15	9	20	1	2	2	0,2	0,2

CQ: complejo químico.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla 4.4 se relaciona el fraccionamiento de la fertilización edáfica por elementos mayores y menores de acuerdo con los planes de nutrición empleados en el VCAM, donde se establecen prioritariamente cinco fertilizaciones durante el desarrollo del ciclo productivo para las variedades comúnmente empleadas. Dichos planes de fertilización difieren de acuerdo con el contenido de nutrientes de los lotes y las recomendaciones de los asistentes técnicos de las zonas. No obstante, el plan fue consolidado a través de encuestas realizadas por AGROSAVIA y validado en diferentes épocas de siembra (Quevedo et al., 2019).

Tabla 4.4. Fraccionamiento de nutrientes a través de la fertilización edáfica por ciclo de cultivo para las variedades recomendadas en el VCAM

Fertilización	Rangos DDE	Elemento						
		N	P	K	Ca	Mg	S	Fe, B, Zn, Cu, Mn
1	8 a 12	20%	100%	20%			20%	
2	15 a 17	20%		25%	50%	50%	20%	100%
3	30 a 34	20%		25%	50%	50%	30%	
4	48 a 52	20%		15%			20%	
5	60 a 64	20%		15%			20%	
6*	75 (Max. Emb.).	5% a 10%*						

DDE: días después de emergencia; Max. Emb.: máximo embuchamiento.

* Suministro adicional de N (5% - 10%), conocido popularmente como "Re-sale".

Fuente: Elaboración propia.

Manejo de arvenses en el sistema productivo de arroz en el VCAM

Las arvenses son plantas no deseadas que generan restricciones biofísicas a los cultivos, pues compiten directamente por luz, agua, nutrientes y espacio físico, de manera que afectan el crecimiento, el desarrollo y, por consiguiente, la capacidad productiva del cultivo (Blanco & Leyva, 2007; Fedearroz, 2018; González-Viera et al., 2023). En el sistema productivo de arroz existen diversas familias y géneros de arvenses que limitan su productividad debido a que reducen la calidad de la cosecha y son hospederas de insectos-plaga y enfermedades (Blanco & Leyva, 2007). Adicionalmente, muchas de estas especies producen compuestos alelopáticos que afectan el crecimiento normal del cultivo (Vásquez et al., 2020). De hecho, el Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (Finagro, 2017) determinó que en Colombia el control de arvenses corresponde a uno de los costos más altos de la producción de arroz, con el 16 %.

Según Pabón (1988) y Navarro (2018), las arvenses en el cultivo de arroz se clasifican de la siguiente manera: a) gramíneas (monocotiledóneas), que se caracterizan por que poseen raíces fibrosas, tallos con nudos y entrenudos redondos, hojas lineales lanceoladas, alternas y dispuestas en dos direcciones y flores con espiguillas; b) ciperáceas (monocotiledóneas), que se caracterizan por que desarrollan raíces fibrosas, tallos triangulares, hojas con cutículas muy cerosas, basales y dispuestas en tres direcciones, y c) hojas anchas (dicotiledóneas), las cuales presentan una raíz primaria o pivotante, tallos herbáceos, semileñosos o leñosos y hojas anchas con venación reticular. A su vez, estas especies se dividen en cuatro grupos de acuerdo con su abundancia en el lote: a) *dominantes*, que se caracterizan por su alta densidad en el cultivo, b) *secundarias*, que son menos abundantes, c) *poco frecuentes* y d) *especies raras*, que se presentan con una baja incidencia (Fuentes, 2010).

El período crítico de interferencia (o período crítico de competencia) es la etapa en la cual se produce un efecto de mayor perjuicio de la competencia de las arvenses. Aunque este período varía según las condiciones ambientales y la disponibilidad de los factores de crecimiento del cultivo y las arvenses (García et al., 2000), en general se ha determinado que las arvenses son más perjudiciales en los estados iniciales del crecimiento y desarrollo del cultivo (Fuentes & Romero, 1991).

La clave para hacer un manejo eficiente de las malezas radica en monitorear de forma constante los lotes para identificar las especies presentes. También es fundamental diseñar una estrategia integrada de manejo, evitar la producción de semillas de malezas resistentes, implementar rotaciones de cultivos y llevar a cabo un control químico planificado. Estas acciones no solo ayudan a reducir la presión de las arvenses, sino que también promueven la sostenibilidad del sistema agrícola, mejoran la salud del cultivo y optimizan los recursos disponibles (Novelli & Cámpora, 2015; Villena, 2022).

Principales arvenses limitantes en la producción de arroz

Una de las especies de arvenses más dominantes es el arroz rojo, caracterizado por su cubierta con color roja (pericarpio), que pertenece a la misma familia y género del arroz cultivado (*Oryza sativa* L.) (Espinoza, 2003). Esta arvense puede generar reducciones del rendimiento hasta del 80% (Moreira-Mendoza, 2018). Además, se identifican otras arvenses agresivas como liendre puerco (*Echinochloa colona* (L). Link), coquito (*Cyperus rotundus* L.), falsa caminadora (*Ischaemum rugosum* Salisb), piñita (*Murdannia nudiflora* L. Brenan), guarda rocío (*Digitaria bicornis* Lam.), paja mona (*Leptochloa mucronata* Michaux Kung) y pelo de indio o también conocida como trompa de mocho (*Fimbristylis miliacea* L.). Adicionalmente, en la tabla 4.5 se relacionan otras arvenses limitantes del sistema productivo del arroz del VCAM.

Tabla 4.5. Arvenses limitantes en el sistema productivo de arroz en el VCAM

Nombre común	Nombre científico	Familia	Tipo
Bledo, bledo blanco	*Amaranthus dubius* Mart. ex Thell.	Amaranthaceae	Hoja ancha
Bledo	*Amaranthus spinosus* L.	Amaranthaceae	Hoja ancha
Chilinchil	*Senna obtusifolia* L.	Fabaceae	Hoja ancha
Palo de agua, botón blanco	*Eclipta alba* L. Hassk.	Asteraceae	Hoja ancha
Rabo de zorro	*Anatherum bicorne* L. P. Beauv.	Poaceae	Gramínea
Suelda-consuelda	*Commelina diffusa* Burm. f.	Commelinaceae	Commelinácea
Coquito amarillo	*Cyperus esculentus* L.	Cyperaceae	Ciperácea
Menta, ajillo	*Cyperus iria* L.	Cyperaceae	Ciperácea
Frijolillo	*Macroptilium lathyroides* L. Urban	Fabaceae	Hoja ancha
Berros	*Limnocharis flava* L. Buchenau	Limnocharitaceae	Hoja ancha
Clavito de agua, Clavito	*Ludwigia decurrens* Walter	Onagraceae	Hoja ancha
Palo de laguna	*Ludwigia erecta* L. H. Hara	Onagraceae	Hoja ancha
Clavito de agua	*Ludwigia linifolia*	Onagraceae	Hoja ancha
Digitaría	*Digitaria bicornis* (Lam.) Roem. & Schult	Poaceae	Gramínea
Guarda rocío	*Digitaria horizontalis* Willd	Poaceae	Gramínea
Pangola	*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koel	Poaceae	Gramínea
Pata de gallina	*Eleusine indica* L. Gaertn	Poaceae	Gramínea
Caminadora	*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) W. Clayton	Poaceae	Gramínea
Paja peluda	*Leptochloa virgata* (L.) P. Beauv	Poaceae	Gramínea
Consuelda, buche de gallina	*Heteranthera limosa* (Sw.) Willd.	Pontederiaceae	Hoja ancha
Verdolaga, cimarroncita	*Portulaca oleracea* L.	Portulacaceae	Hoja ancha
Tomatillo, vejigón	*Physalis angulata* L.	Solanaceae	Hoja ancha
Batatilla	*Ipomoea triloba* L.	Convolvulaceae	Hoja ancha
Escoba negra	*Corchorus hirtus* L.	Malvaceae	Hoja ancha

Fuente: Adaptado de Fuentes et al. (2010), Montealegre (2011), Ramírez et al. (2015) y Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña, 2017).

Estrategias de manejo de arvenses en el VCAM

Las arvenses en el cultivo de arroz representan un desafío global y hacen necesario implementar prácticas de manejo integrado de arvenses (MIA) con el fin de lograr controles efectivos, sostenibles y respetuosos con el medioambiente (Cuevas et al., 2003). El MIA se define como un sistema que combina diversas prácticas para prevenir la invasión, propagación y competencia de las arvenses, al mismo tiempo que promueve el crecimiento y la competitividad del arroz. De esta manera, el MIA busca maximizar la productividad del cultivo sin causar alteraciones significativas al medioambiente (Navarro, 2018).

Las poblaciones de arvenses son influidas por diversos factores, como la densidad, el tipo de maleza, el momento de la infestación, las condiciones ambientales y el genotipo de arroz cultivado (García et al., 2000). Se ha observado que tanto el tamaño como la estructura de estas poblaciones cambian significativamente a lo largo del tiempo. Específicamente, el tamaño de una población se refiere al número total de individuos, mientras que la estructura se relaciona con la organización de esos individuos, que se clasifica según características particulares como el estado de desarrollo (Booth et al., 2003). Por lo tanto, es esencial implementar un MIA en el sistema productivo que incluya prácticas de manejo culturales, mecánicas, biológicas y químicas con el objetivo de limitar el desarrollo y la infestación de las malezas, de tal manera que no se generen pérdidas económicas y se asegure una producción sostenible y equilibrada (Fuentes, 2010). Según Fuentes y Romero (1991), las pérdidas del rendimiento que ocasionan las arvenses en competencia con el cultivo de arroz pueden ser del 54 % cuando no se realiza ningún control. Por ello, en los sistemas de producción del VCAM se emplean las prácticas de manejo de arvenses que se describen en los siguientes apartados.

Control cultural

El control cultural consiste en implementar prácticas que favorezcan el crecimiento del cultivo y creen condiciones desfavorables para las arvenses, de tal

manera que su efectividad radica en establecer un cultivo vigoroso que compita con ellas de manera eficiente. Entre las prácticas de control cultural más utilizadas se incluyen el uso de genotipos de arroz vigorosos, la fertilización nitrogenada después del deshierbe, la buena distribución y uso de semilla registrada al momento de la siembra, elegir una época adecuada para establecer la plantación, la rotación de cultivos, el uso de coberturas y la siembra directa e inundación del lote (Navarro, 2018). Las tres últimas se abordan a continuación debido a su gran relevancia y adopción en el VCAM:

- Rotación de cultivos: se refiere a la práctica de sembrar diferentes cultivos de manera alternada en el mismo campo a lo largo del año. Esta estrategia tiene múltiples objetivos, como maximizar el uso del terreno en períodos en los cuales el cultivo principal no puede ser sembrado, así como restaurar y mantener la salud del suelo, reducir la presencia de malezas y la incidencia de plagas y enfermedades (Ávila, 2000; Vasyl, 2024). Es una práctica muy común en muchas zonas del VCAM, en el cual se emplea la rotación del arroz con maíz y algodón (Ouazaa et al., 2022). Entre los múltiples beneficios demostrados que tiene la rotación del cultivo de arroz con algodón se encuentra que puede aumentar 20 % la producción del primero en relación con la cosecha anterior (Rodríguez, 2024). Además, trae consigo otros beneficios, como disminuir la presencia de arroz rojo y otras malezas específicas del cultivo (García-Quiroga, 2018).
- Uso de coberturas: aunque es una estrategia con poca adopción en el VCAM, es clave en el MIA porque proporciona varios beneficios para el agroecosistema, como la protección del suelo contra la erosión, el incremento de la diversidad biológica al incluir organismos benéficos y la supresión de las malezas (Teasdale, 2004). Asimismo, el uso de coberturas contribuye a reducir la biomasa de las malezas, disminuye la producción de sus semillas y, por lo tanto, baja la adición al banco de semillas del suelo (Fernando & Shrestha, 2023).

  Las especies que se usan comúnmente como coberturas vegetales incluyen leguminosas como crotalaria (*Crotalaria juncea*) y fríjol mungo (*Vigna radiata* L.), las cuales enriquecen el suelo con nitrógeno al actuar

como cultivos fijadores. También se emplean gramíneas como el milleto (*Pennisetum glaucum*), así como otras plantas de hoja ancha (Vasyl, 2022). La selección de la especie adecuada para usar como cobertura se basa en características como la facilidad de establecimiento, la capacidad de cobertura del suelo, la baja competitividad con el cultivo principal y la facilidad de incorporación (Fernando & Shrestha, 2023)

- Siembra directa e inundación del lote: estas prácticas, comunes en el VCAM, tienen un papel crucial en el manejo de las etapas iniciales del cultivo y las arvenses, ya que influyen en la velocidad de crecimiento de las especies (Vallejos-Espinoza, 2018). Esta característica es un factor clave en las relaciones competitivas entre arvenses y cultivos, además de que determina la magnitud de las pérdidas que haya en el rendimiento, razón por la cual se puede mejorar la competitividad del cultivo y reducir el impacto por arvenses como el arroz rojo si se optimizan estas prácticas (Ávila, 2000; Ramírez, 2014).

  Específicamente, la primera consiste en realizar una siembra directa en un lote con coberturas, que pueden ser arvenses nobles o poblaciones de malezas emergidas, las cuales se controlan con la aplicación de un herbicida no selectivo (véase la sección de control químico). La inundación, por su parte, está más relacionada con el sistema de riego por piscinas donde se realiza la siembra por trasplante manual o mecanizado.

Control mecánico

El control mecánico se enfoca en abordar problemas de malezas ya establecidos, en contraste con el control cultural. La estrategia se centra en preparar el suelo utilizando herramientas adecuadas para asegurar un sustrato libre de malezas, con un mínimo de residuos vegetales y semillas de arvenses, lo cual crea una cama óptima para la siembra (Díaz-Ramírez, 2015; Fuentes, 2010). La eficacia de la preparación del suelo depende de diversos factores, como el tipo de herramienta utilizada, las propiedades físicas del suelo, el nivel de infestación de arvenses (banco de semillas), así como la intensidad y frecuencia de los trabajos mecanizados (García et al., 2000). Por esta razón, en el VCAM

se emplean métodos mecánicos como el "pase" de arado o rastrillo pulidor en el sistema de siembra por surcos o el "fangueo" del suelo, cuando se siembra por trasplante manual o mecanizado en piscinas.

Control químico

Esta estrategia, que se ha convertido en una práctica casi indispensable en la producción de cereales, se basa en el control de arvenses mediante la aplicación de una o más moléculas químicas (herbicidas) en mezcla. Al respecto se debe señalar que el cultivo de arroz es un sistema de monocultivo altamente dependiente de controles químicos de malezas y uso de diferentes moléculas de herbicidas (Ramírez, 2014). Según Clavijo (2010), en Colombia es el cultivo semestral que utiliza el mayor número de moléculas de herbicidas y las más altas dosis de ingrediente activo por hectárea. Dado que el control químico tiende a volverse cada vez menos eficiente cuando se utiliza como único método, para maximizar su efectividad es crucial integrar el uso de herbicidas con otras estrategias con el fin de establecer un manejo de arvenses adaptado a las condiciones específicas de cada sitio de cultivo (Pabón, 1988). También es importante determinar la dinámica poblacional de las malezas en función del tipo, la cantidad y la distribución de los individuos que componen el sistema, así como establecer qué ingredientes activos o moléculas y en qué estados de aplicación son más efectivos (Booth et al., 2003; Ramírez, 2014).

En general, antes de la siembra se aplican productos que actúan como quemantes no selectivos, y después se realizan aplicaciones post-tardías de herbicidas hasta la etapa de máximo macollamiento o que implican el uso de hasta seis ingredientes activos diferentes distribuidos en dos quemas (control no selectivo), un sello (pre-emergente) y dos post-emergentes. Cabe resaltar que en muchos casos se genera una alta resistencia de las malezas a los ingredientes activos, lo cual aumenta la presión por competencia con el cultivo e incrementa los costos del control, que pueden alcanzar hasta el 20 % del costo total de producción (Clavijo, 2010). Específicamente, en los sistemas productivos

del VCAM se emplean tres tipos de controles químicos según las etapas de desarrollo del cultivo y las arvenses, los cuales se denominan controles en pre-siembra, pre-emergencia y post-emergencia al cultivo:

- **Control químico en pre-siembra y pre-emergencia al cultivo:** el control en pre-siembra, comúnmente denominado *quema*, se realiza antes de la siembra y después de la adecuación del lote. En ese momento se aplican herbicidas de síntesis química que actúan como quemantes no selectivos con el fin de eliminar cualquier arvense en la superficie del lote. Generalmente, se realizan de una a tres "quemas" con el fin de disminuir la presión del arroz rojo o de otras malezas limitantes. Posteriormente, el control en pre-emergencia se realiza después de la siembra con un contenido de humedad de suelo cercano a capacidad de campo. Antes de la emergencia de las arvenses y el arroz, esta estrategia busca inhibir el crecimiento de las arvenses con el objetivo de reducir la abundancia de sus poblaciones y, de esta manera, permitir que el cultivo de arroz se establezca sin competencia (Fedearroz, 2018; Ramírez, 2014).
- **Control químico en post-emergencia al cultivo:** en el VCAM, debido principalmente a la alta presión que ejercen las arvenses nocivas, se requiere complementar el control del sello (pre-emergencia) con el uso de uno o más controles post-emergentes, de manera que los herbicidas se aplican luego de la emergencia de las malezas y el cultivo hasta la etapa de máximo macollamiento (Clavijo, 2010; Ramírez, 2014). Para que sean efectivos estos controles, se recomienda aplicar los herbicidas en los primeros estados fenológicos de las malezas, pues en estas etapas son más susceptibles al mecanismo de acción (Ramírez, 2014).

  La eficacia de los ingredientes activos depende de diversas variables intrínsecas, como las características químicas y los mecanismos de acción, así como de variables extrínsecas, como la arquitectura de la planta, la cutícula y forma de la hoja, las condiciones ambientales durante la aplicación y la humedad del suelo (Rosales & De la Garza, 2006). En tal sentido, es fundamental considerar estos aspectos para maximizar la efectividad del herbicida y, si es necesario, evaluar la necesidad de realizar un control post-tardío.

En general, se destaca que los controles químicos presentan diferencias de acuerdo con el sistema de siembra, el genotipo, la dinámica poblacional de las malezas o las zonas de producción. A su vez, las recomendaciones de manejo se establecen según la forma de aplicación y la condición del cultivo (estado fenológico, humedad del suelo, tipo y tasa de siembra o densidad poblacional). Por lo tanto, es necesario recibir la asesoría de un asistente técnico que determine las recomendaciones de las mezclas y dosis de los ingredientes activos que se deben utilizar, el estado de las arvenses y la etapa del cultivo en el momento de hacer el control. En relación con ello, la tabla 4.6 presenta los principales herbicidas utilizados para el control de arvenses.

Tabla 4.6. Principales herbicidas empleados para el control de arvenses en el VCAM

Ingrediente activo	Grupo HRAC	Modo de acción	Dosis recomendada	Etapa del cultivo*	Tipo de arvenses*
Glifosato 480 g L^{-1}	9	Inhibidor de la enzima 5-enolpiruvil shikimato 3-fosfato sintetasa (EPSPS)	3	Pre-siembra	Hojas anchas y gramíneas
Glufosinato de amonio 200 g L^{-1}	10	Inhibidores de la enzima glutamina sintetasa	1,5 a 2,0	Pre-siembra	Hojas anchas y gramíneas
Paraquat 200 g L^{-1}	22	Inhibición del flujo del fotosistema I de la fotosíntesis (PSI)	1,3 a 1,6	Pre-siembra	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Penoxsulam 240 g L^{-1}	2	Inhibidores del acetato sintetasa (ALS)	0,3	Pre-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Pendimetalina 400 g L^{-1}	3	Inhibidores de microtubulinas	4	Pre-emergente	Gramíneas y hojas anchas
Clomazone 480 - 800 g L^{-1}	13	Inhibidores de la enzima 1-desoxi-D-xilulosa-5-fosfato sintasa (DOXP)	1,2 a 1,7	Pre-emergente	Gramíneas
Oxadiazon 250 - 380 g L^{-1}	14	Inhibidor de la enzima protoporfirinógeno-IX-oxidasa	4,0 a 4,5 2,3 a 2,6	Pre-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas

Continúa

Continuación

Ingrediente activo	Grupo HRAC	Modo de acción	Dosis recomendada	Etapa del cultivo*	Tipo de arvenses*
Oxyfluorfen 240 - 480 g L^{-1}	14	Inhibidor de la enzima protoporfirinógeno-IX-oxidasa	1,0 a 1,5	Pre-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Butaclor 600 g L^{-1}	15	Inhibidores de los ácidos grasos de larga cadena (VLCFA)	3	Pre-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Cyhalofop 180 g L^{-1}	1	Inhibición de la enzima acetil coenzima A carboxilasa	1,0 a 1,5	Post-emergente	Gramíneas
Fenoxaprop 69 g L^{-1}	1	Inhibición de la enzima acetil coenzima A carboxilasa	0,6 a 0,8	Post-emergente	Gramíneas
Profoxydim 200 g L^{-1}	1	Inhibición de la enzima acetil coenzima A carboxilasa	0,75	Post-emergente	Gramíneas
Bispiribac sodio 100 - 400 g L^{-1}	2	Inhibidores del acetato sintetasa (ALS)	0,3 a 0,4	Post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Imazamox 33 g L^{-1}+ Imazapir 15 g L^{-1}	2	Inhibidores del acetato sintetasa (ALS)	1,5	Post-emergente	Arroz rojo, hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Metsulfurón metil 600 g kg^{-1}	2	Inhibidores del acetato sintetasa (ALS)	15 g ha^{-1}	Post-emergente	Ciperáceas y hojas anchas
Ácido 2,4 diclorofenoxiacetico 400 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	1 a 2,0	Post-emergente	Hojas anchas
Aminopyralid 40 g L^{-1} + Ácido 2,4-D 320 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	0,5	Post-emergente	Hojas anchas
Aminopyralid 40 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	3	Post-emergente	Hojas anchas
Florpyrauxifen-benzyl 25 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	1,2	Post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Triclopir 480 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	0,75	Post-emergente	Hojas anchas

Continúa

Continuación

Ingrediente activo	Grupo HRAC	Modo de acción	Dosis recomendada	Etapa del cultivo*	Tipo de arvenses*
Picloram 240 g L^{-1}	4	Inhibidores auxínicos	0,8 a 1,0	Post-emergente	Hojas anchas
Propanil 480 - 800 g L^{-1}	5	Inhibidores del fotosistema PSII (Serina 264)	4,3	Post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Bentazon 480 g L^{-1}	6	Inhibidores del fotosistema PSII (Histidina 215)	1,0 a 1,5	Post-emergente	Hojas anchas y ciperáceas
Carfentrazone ethyl 400 g L^{-1}	14	Inhibidor de la enzima protoporfirinógeno-IX-oxidasa	0,1 a 0,125	Post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Imazetapir 100 g L^{-1}	2	Inhibidores del acetato sintetasa (ALS)	0,45	Pre-emergente y post-emergente	Arroz rojo, hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Pyrazosulfurón 750 g kg^{-1}	2	Inhibidores de la enzima enolpyruvilsinkimata fosfato sintetasa (EPSPS)	500 g ha^{-1}	Pre-emergente y post-emergente	Hojas anchas y ciperáceas
Diflufenican 500 g L^{-1}	12	Inhibidores de la enzima fitoena desaturasa (PDS)	0,5 kg ha^{-1}	Pre-emergente y post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Saflufenacil 700 g kg^{-1}	14	Inhibidor de la enzima protoporfirinógeno-IX-oxidasa	55 a 200 g ha^{-1}	Pre-emergente y post-emergente	Hojas anchas y ciperáceas
Pretilaclor 500 g L^{-1}	15	Inhibidores de los ácidos grasos de larga cadena (VLCFA)	4,0 a 5,0	Pre-emergente y post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Butaclor 350 g L^{-1} + Propanil 350 g L^{-1}	15--5	Inhibidores de los ácidos grasos de larga cadena (VLCFA) / Inhibidores del fotosistema PSII (Serina 264)	4	Pre-emergente y post-emergente	Hojas anchas, ciperáceas y gramíneas
Quinclorac 250 - 350 g L^{-1}	26	Inhibición de la síntesis de la pared celular (celulosa)	1,5 – 2,0	Pre-emergente y post-emergente	Gramíneas y ciperáceas

Fuente: Adaptado de Herbicide Resistance Action Committee (2021), Ramírez (2014), PLM Colombia (2024) y Tecno Agrícola (2024).

Control de arvenses mediante el sistema Clearfield®

Existe un método de control de arvenses basado en la implementación del sistema Clearfield®, el cual brinda un manejo efectivo de las arvenses, especialmente del arroz rojo (*Oryza sativa* L.) (Arguissaín & Kraemer, 2011). Específicamente, esta estrategia se basa en el desarrollo y uso de genotipos resistentes a los herbicidas del grupo de las imidazolinonas (IMI) (Chilian, 2018; Sudianto et al., 2013). Para generar dichos materiales de arroz se sometieron semillas con el mutágeno etil metano sulfonato (EMS) (Sudianto et al., 2013) y como resultado se encontró una población de plantas que guardaban una mutación en la enzima acetolactato sintasa (ALS), que es responsable de la biosíntesis de los aminoácidos leucina, isoleucina y valina (Cobb, 2022; Croughan, 2003; Shaner, 2017).

Por otra parte, los herbicidas del grupo de las IMI actúan como inhibidores no competitivos de la enzima ALS deteniendo la producción de aminoácidos (Cobb, 2022; Shaner et al., 1984), de manera que las plantas mueren porque no pueden sintetizar proteínas esenciales para la división celular (Shaner et al., 1984). En el grupo de las IMI se destacan los ingredientes activos imazapic, imazamox e imazapir, que son los más utilizados para controlar el arroz rojo (Ramírez, 2014). Adicionalmente, estas moléculas permiten controlar otros tipos de malezas, como *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv., *Digitaria* spp., *Paspalum pilosum* Lam., *Murdannia nudiflora* L. Brenan, *Cyperus iria* L., *Cyperus esculentus* L. y *Physalis angulata* L. cuando se usan en dosis bajas (Pellerin et al., 2004; Scott, 2012; Sudianto et al., 2013).

En cuanto a los genotipos registrados ante el ICA con mayor reporte de siembra en el VCAM, se destacan las variedades de Fedearroz CF-205 (primera generación) y F-IBIS CI, junto con Only Rice 228 del Aceituno y el nuevo híbrido Aries CL de Interoc. La siembra de estos genotipos no solo permite mejorar el rendimiento porque se disminuye la competencia de las malezas, sino que también promueve un manejo más sostenible del cultivo por cuanto emplea menores dosis de aplicación en relación con otros herbicidas.

Recomendaciones complementarias de manejo agronómico

En un ámbito de sostenibilidad es fundamental implementar recomendaciones de manejo agronómico en el cultivo del arroz que optimicen el rendimiento del cultivo y permitan reducir su impacto ambiental. Estas estrategias deben surgir a partir del conocimiento técnico y ser ajustadas a las condiciones específicas del suelo, clima y tipo de cultivo. A continuación, se destacan algunas estrategias clave que todo agricultor o técnico debería tener en cuenta para adaptarse al cambio climático y mitigar sus efectos.

Estrategias de mitigación y adaptación

Las actividades agrícolas también contribuyen al calentamiento global: entre el 10 % y el 14 % del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y el 18 % del metano total se emite desde los arrozales con cáscara. Por lo tanto, las estrategias de mitigación y adaptación para frenar las emisiones de gases de efecto invernadero de los arrozales se enmarcan en las siguientes recomendaciones: 1) implementar técnicas de riego que alternen humedecimiento y secado (AWD); 2) intercalar los cultivos de arroz con vegetación de corta duración (coberturas); 3) limitar los fertilizantes químicos mediante una agricultura precisa; 4) usar cultivares de arroz con baja emisión de metano; 5) mejorar el laboreo; 6) reciclar los residuos agrícolas para producir fertilizantes orgánicos y 7) desarrollar un sistema integrado de cultivo de arroz (figura 4.13).

Además, es necesario desarrollar estrategias para hacer frente a los efectos del cambio climático en la producción de arroz, como aplicar metanótrofos anaeróbicos para oxidar el CH_4 y desarrollar cultivares de arroz de alto rendimiento que sean tolerantes al estrés abiótico (temperatura, sequía) y resistentes mediante el uso de diferentes herramientas nuevas de mejora, ingeniería genética y genómica. Asimismo, se deben considerar otras opciones de gestión para

tratar de resolver los problemas climáticos, por ejemplo, el desarrollo de equipos agrícolas resistentes a la intemperie, la rotación de cultivos, el uso de coberturas, los ajustes en las fechas de cultivo y el empleo de la previsión climática mediante la teledetección y la modelización.

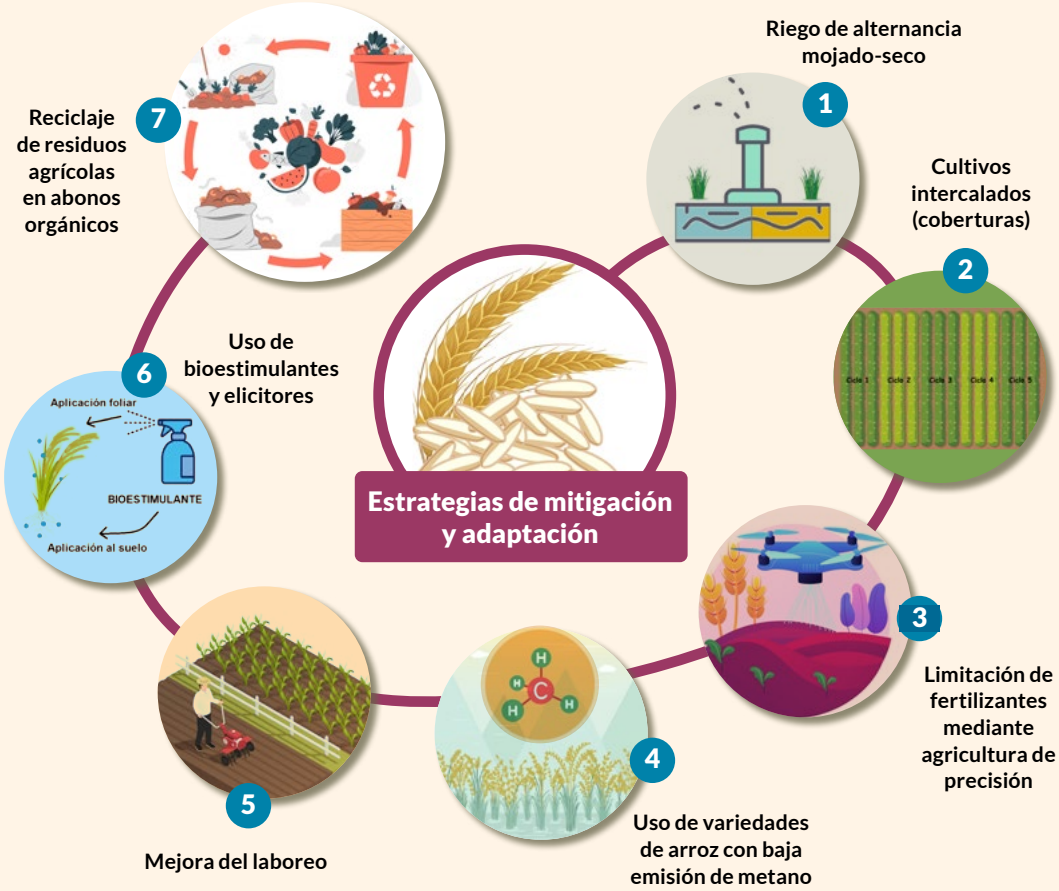


Figura 4.13. Estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático.

Fuente: Elaboración propia con imágenes tomadas de Vecteezy.com.

Respuestas de las plantas de arroz a condiciones ambientales adversas

El estrés es un término generalmente utilizado para describir el impacto de fuerzas adversas sobre un organismo, población o comunidad (Ashraf & Harris, 2005). En este sentido, existen dos clasificaciones del estrés en plantas, las cuales se diferencian de acuerdo con el origen de su causa: a) estrés abiótico (cualquier condición ambiental adversa que afecta el crecimiento y el desarrollo de las plantas) y b) estrés biótico (originado a partir de interacciones negativas con organismos vivos que pueden causar daño a las plantas) (Cramer et al., 2011; Taiz et al., 2015).

La severidad del estrés en plantas se puede definir en términos de la magnitud o intensidad del factor estresante y la duración o período de exposición de la planta ante dicha condición. La interacción de estos dos aspectos genera diferentes respuestas sobre los procesos fisiológicos, bioquímicos y de crecimiento de las plantas que repercutirán en la productividad del cultivo. Por lo tanto, un estrés puede ser leve, moderado o severo, pero generalmente se evidencia en el tipo de limitaciones de la fotosíntesis, que suelen ser estomáticas y no estomáticas (Chaves et al., 2003; Levit, 1980; Taiz & Zeiger, 2015). El esquema de la figura 4.14 resume la interacción de las plantas de arroz con diferentes factores de estrés abiótico que se podrían encontrar en el VCAM.

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales del VCAM, se han identificado algunos factores que pueden generar condiciones de estrés abiótico en las plantas de arroz. En particular, Restrepo-Díaz y Garcés-Varón (2013) concluyeron que la exposición a períodos cortos de altas temperaturas diurnas (dos horas y media a 40 °C durante cinco días consecutivos) en plantas de genotipos de arroz F-50 y F-733 (cultivares que han sido utilizados en el VCAM) afectaron significativamente la tasa de fotosíntesis, la apertura de estomas, la eficiencia máxima del PSII y la concentración de clorofilas (unidades SPAD). Además, este período de estrés incrementó el número de espigas estériles, lo cual impactó negativamente la productividad de los cultivares evaluados.

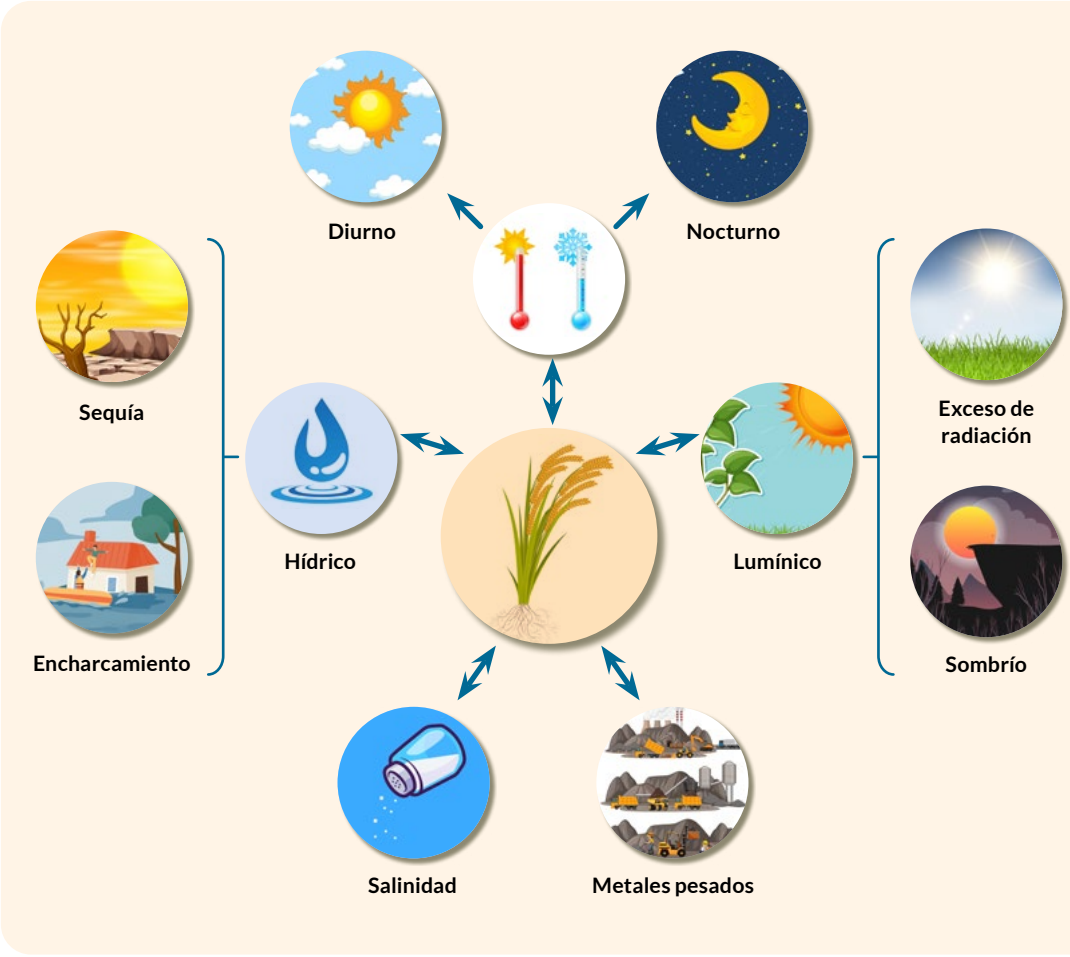


Figura 4.14. Escenarios de estrés abióticos en cultivos de arroz.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.

Similar tendencia fue reportada por Sánchez-Reinoso et al. (2013) en tres cultivares de arroz colombianos: F-60, F-733 y F-473. Estos autores evaluaron un período de estrés de cinco horas diarias durante diez días consecutivos, en el cual las plantas de arroz fueron expuestas a temperaturas de 25 °C, 35 °C y 40 °C, respectivamente. Entre los resultados más interesantes está que en temperaturas de 40 °C el cultivar F-60 mostró la menor tasa fotosintética y la mayor tasa respiratoria, lo cual explica su bajo rendimiento en condiciones de

estrés térmico. Ahora bien, aunque todos los cultivares presentaron mayor daño por estrés oxidativo, el cultivar F-473 mostró menores niveles de MDA, lo cual indica mayor tolerancia al calor. Cabe mencionar que las metodologías utilizadas por los investigadores podrían ser útiles para seleccionar líneas tolerantes al calor en programas de mejoramiento en Colombia.

Ante estos escenarios, varios investigadores han analizado algunas medidas para mitigar el impacto del estrés en plantas de arroz cultivadas en el VCAM, como el uso de bioestimulantes (Quintero-Calderón et al., 2021), reguladores de crecimiento (Pantoja-Benavides et al., 2021) o compuestos de boro (Calderón-Páez et al., 2021). Entre los resultados más relevantes de estos trabajos se identificó el uso de brasinoesteroides (BR), aminoácidos (AA), nitrofenolatos (NP) o un bioestimulante basado en extractos botánicos (EB) en plantas de arroz F-60 y F-67, en las cuales se evidenció que la producción de malondialdehído y prolina se reducía en condiciones de estrés debido a altas temperaturas diurnas (Quintero-Calderón et al., 2021). Similar tendencia fue reportada por Pantoja-Benavides et al. (2021) en plantas de F-67 y F-2000 que contaron con la aplicación foliar de auxinas (AUX), brasinoesteroides (BR), citoquininas (CK) o giberelinas (GA), o con aplicaciones foliares de ácido bórico (BA) o borato de sodio (SB) utilizadas por Calderón-Páez et al. (2021).



5

Del suelo al dato: fundamentos y prospectivas para la agricultura de precisión en el VCAM

Nesrine **Chaali**
Sofiane **Ouazaa**
Camilo Ignacio **Jaramillo-Barrios**
Jhon Edison **Calderón**

Introducción

Este capítulo ofrece una guía integral para comprender y gestionar las variables críticas del manejo agronómico y del recurso suelo en los sistemas de producción de arroz en el VCAM, de tal manera que se pueda promover su sostenibilidad y eficiencia. Posteriormente, se analiza el manejo del recurso suelo, con énfasis en las propiedades físicas y químicas de los suelos arroceros y su influencia en la productividad. Específicamente, se detallan características del suelo como la textura, la estructura y la porosidad del suelo, y se explica cómo pueden afectar el movimiento y la retención de agua, esenciales para el crecimiento del arroz. También se describe la variabilidad espacial y temporal del suelo, así como el uso de herramientas de agricultura de precisión 4.0 con el fin de optimizar la aplicación de insumos.

Propiedades de los suelos arroceros

La productividad de los suelos de arroz en el VCAM depende en gran medida de la fertilidad del suelo o de su naturaleza química. Aunque existen varias propiedades físicas del suelo que son importantes para el cultivo de arroz o para los sistemas de cultivo basados en este, el hecho de que el arroz se siembre principalmente en suelos de tierras bajas (en los arrozales) hace que algunas propiedades físicas pierdan relevancia, siempre y cuando haya suficiente agua disponible.

La consideración sobre las propiedades físicas del suelo se centra en los espacios porosos donde ocurre la retención y el movimiento de agua y aire. Sin embargo, la naturaleza del espacio poroso depende totalmente del componente sólido del volumen del suelo y está influida por la distribución del tamaño de las partículas (textura del suelo), así como por la disposición de las partículas del suelo (estructura del suelo).

Si bien el arroz puede crecer satisfactoriamente en suelos con características físicas y químicas muy variadas, pues tolera bien la ocurrencia de algunas condiciones de suelo desfavorables, para obtener altos rendimientos de arroz con

menores costos, tanto en la fertilización y uso de correctivos como en labores de manejo del suelo y del agua, es necesario seleccionar aquellos suelos que presentan menos limitaciones para su manejo y para el crecimiento de las plantas.

Específicamente, el arroz requiere suelos que tengan las siguientes características físicas: alta capacidad de absorción y retención de agua, baja permeabilidad y moderada compactación. Estos aspectos están relacionadas con la textura, la estructura, la densidad aparente y la porosidad, como se describe en los siguientes apartados.

Textura del suelo

La textura representa la distribución de los diversos tamaños de partículas presentes en los suelos. Un suelo se describe como de textura gruesa, media o fina dependiendo del tamaño predominante de las partículas. Además, la textura del suelo determina si un área es adecuada para mantener un sistema de producción de arroz, pues influye en la transmisión y almacenamiento de agua, el flujo de aire en el suelo y su capacidad para suministrar nutrientes.

En general, los suelos de textura fina son más fértiles que los de textura gruesa, principalmente debido a la influencia de un mayor contenido de arcilla (y materia orgánica), lo cual está relacionado con el suministro de nutrientes. Los suelos de textura fina también se denominan *suelos pesados* porque el laboreo es a menudo difícil de realizar en ciertas condiciones de humedad. En contraste, el término *suelo ligero* se refiere a los suelos de textura gruesa e implica que se requiere un menor esfuerzo para el laboreo.

De igual forma, la textura del suelo también desempeña un papel importante en la gestión del riego y los fertilizantes: el tamaño pequeño de los poros en los suelos de textura fina hace que el movimiento del agua sea más lento que en los suelos de textura gruesa, de manera que la aplicación excesiva de fertilizantes o agua a suelos de textura gruesa puede aumentar las pérdidas debido al lixiviado o la percolación profunda.

En este sentido, cuando se aplica la misma cantidad de agua a suelos de diferentes texturas, como franco-arenoso y franco-arcilloso, se observan resultados distintos. En suelos franco-arenosos, con partículas y poros grandes, el agua se mueve principalmente por gravedad, de forma que se produce una infiltración vertical rápida y un bulbo mojado estrecho (figura 5.1a). En suelos franco-arcillosos, con partículas finas y poros pequeños, el agua se desplaza principalmente por capilaridad, razón por la cual se extiende horizontalmente y formando un bulbo mojado más amplio que tarda más en alcanzar la misma profundidad (figura 5.1b).

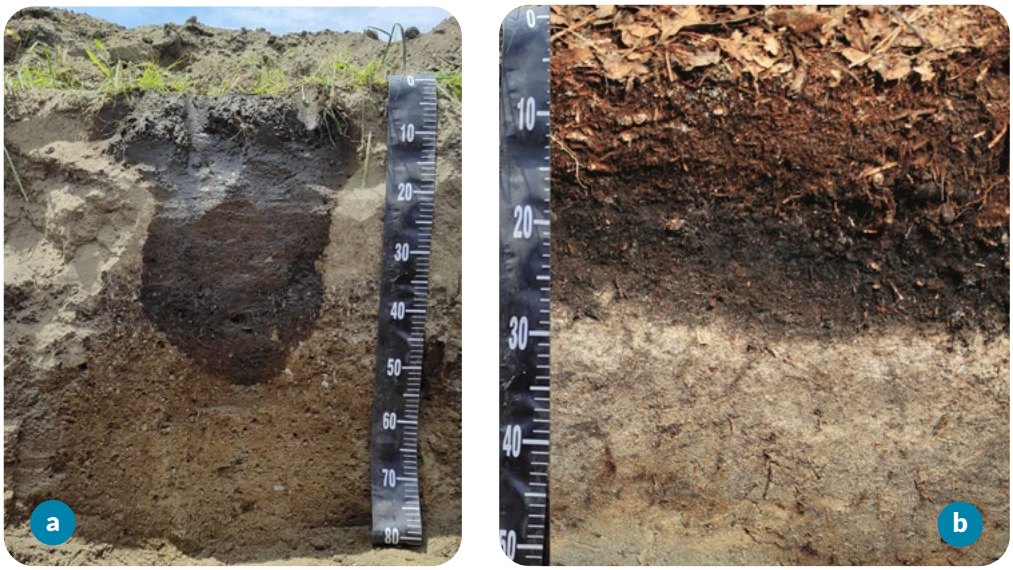


Figura 5.1. Comparación entre el perfil del agua. **a.** En suelo franco-arenoso; **b.** En suelo franco arcilloso.

Fotos: Juan Felipe Vélez-González.

Estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere al patrón de disposición espacial que tienen las partículas dentro de una masa de suelo, lo cual implica el tamaño, la forma y la durabilidad de los agregados y su estabilidad. Específicamente,

la formación de los agregados es el resultado de procesos de contracción y expansión que movilizan las partículas del suelo, de tal forma que se incrementan los puntos de contacto entre ellas y se altera el sistema poroso (Horn & Smucker, 2005). Así, las propiedades y características de un sistema poroso son fundamentales para describir la estructura del suelo.

El desarrollo del suelo está influido por varios factores, entre los cuales se incluyen el tipo de material parental, el clima, la topografía y la actividad biológica. La interacción de estos factores en el transcurso del tiempo permite que el suelo evolucione desde un estado masivo hacia la formación de agregados cada vez más estables (figura 5.2), pues los cambios en la forma, el tamaño y la distribución de los agregados mejoran la calidad y la funcionalidad de la estructura del suelo, es decir, la hace más útil desde una perspectiva agrícola. En síntesis, una estructura más desarrollada facilita un mejor flujo de agua a través del sistema poroso.



Figura 5.2. Flujo del agua a través de distintos tipos de estructura del suelo.
Fuente: Adaptado de FAO (2006).

Respecto a lo que sucede en los campos de arroz inundados, si bien la estructura del suelo es irrelevante porque el proceso de anegamiento la destruye, se debe tener en cuenta que las partículas del suelo, especialmente las arcillas y los limos finos, rara vez se presentan como unidades individuales en los campos inundados, incluso cuando se les permite secarse. Por esta razón, los campos secos a menudo muestran una estructura masiva (figura 5.2), particularmente en la capa endurecida o en la capa de tráfico, lo cual dificulta el movimiento vertical del agua y ayuda a mantener el agua estancada en la superficie (Briones, 1969).

Ahora bien, continuando con el análisis de la estructura del suelo, esta se evalúa generalmente con métodos indirectos utilizando varios índices, como la densidad aparente, la porosidad, la distribución del tamaño de los poros y la agregación del suelo, que incluye la estabilidad y la distribución que tiene el tamaño de los agregados.

Densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre la masa de los sólidos del suelo (suelo secado en horno) y el volumen total de ese suelo. En una masa de suelo dada, el volumen total (V_T) se compone del volumen de sólidos (V_S) y del volumen del espacio poroso (V_{PS}) que contiene agua y aire. La masa total (M_T) está compuesta por la masa de los sólidos del suelo (M_S) más la masa del agua presente (M_W). La masa del aire es despreciable y se omite en el cálculo. Así, la densidad aparente (D_b) se representa por la siguiente fórmula:

$$D_b = \frac{M_s}{V_T}$$

La densidad aparente se expresa como masa por unidad de volumen, normalmente en g/cm^3. Los valores de densidad aparente tienden a ser menores a medida que la textura del suelo se vuelve más fina. Esto se debe a la tendencia de

las partículas más finas a agregarse, lo cual resulta en mayores cantidades de espacio poroso en comparación con un suelo con partículas gruesas.

Porosidad

La cantidad de espacio poroso, conocida como *porosidad total*, se define como la fracción del volumen total del suelo que está ocupada por los poros. Se calcula en función del volumen de los poros (V_{PS}) y del volumen total del suelo (V_T).

$$\emptyset = \frac{V_{Ps}}{V_T}$$

La porosidad llena de aire es la fracción del espacio poroso que no está ocupada por agua y se expresa en términos del volumen total del suelo. En campos inundados saturados, se espera que todos los poros estén llenos de agua, por lo que en este caso la porosidad se denomina *porosidad llena de agua*. La porosidad total rara vez se determina directamente, ya que puede estimarse a partir de las relaciones entre la densidad aparente y la densidad de partículas del suelo. Finalmente, cabe señalar que la porosidad depende tanto de la textura como de la estructura del suelo, ya que se forman espacios entre las partículas dentro de un agregado, así como entre agregados.

Movimiento del agua en los suelos arroceros

Las plantas de arroz absorben agua del suelo y la transportan hacia arriba a través de las raíces y los tallos, liberándola luego en forma de vapor mediante las hojas y los tallos hacia la atmósfera (proceso conocido como *transpiración*). El movimiento del agua a través de la planta está impulsado por diferencias en el potencial hídrico: el agua fluye desde un potencial alto hacia un potencial bajo.

El concepto de potencial hídrico es crucial para entender este proceso. El potencial hídrico es una medida de la energía potencial del agua en un sistema en comparación con el agua pura, donde el potencial del agua pura se establece en cero. Este determina la dirección del movimiento del agua y está influido por factores como la concentración de solutos y la presión. En el sistema continuo suelo-planta-ambiente, el agua fluye desde el suelo, con un potencial relativamente alto, a través de la planta hacia la atmósfera justo fuera de las hojas, que tiene un potencial relativamente bajo. Los potenciales en el sistema continuo suelo-planta-atmósfera suelen ser negativos y también usamos el término *tensión*, que tiene el valor opuesto. El término *tensión* es intuitivamente más fácil de entender: una alta tensión sugiere un elevada "fuerza de tracción". Así, el agua fluye desde una baja tensión en el suelo (baja fuerza de tracción) a una alta tensión en la atmósfera (alta fuerza de tracción).

La tensión del agua en la atmósfera fuera de las hojas está determinada por factores climáticos: humedad relativa, velocidad del viento, temperatura y radiación solar. Esta tensión atmosférica se traduce en la *demanda evaporativa* de la atmósfera, que determina las tasas potenciales de transpiración. La tensión del agua en el suelo está determinada por la cantidad de agua en el suelo y por las propiedades físicas del suelo, como la textura y la densidad aparente.

La velocidad con la cual el agua se mueve a través de la planta está determinada por la diferencia en la tensión del agua entre el suelo y la atmósfera (cuanto mayor sea la diferencia, más rápido fluirá el agua) y por la resistencia al flujo de agua en la planta (Ehlers & Goss, 2003). Primero, el agua del suelo necesita superar una resistencia física (la epidermis) para entrar en las raíces. Luego, fluye a través de las células o de los espacios entre las células hacia los llamados *xilema* o *haces vasculares* que la transportarán hacia arriba.



Variabilidad espacio-temporal de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo varían en el tiempo y son influidas principalmente por las condiciones climáticas, el ciclo de cultivo, la gestión del riego y las prácticas de fertilización. En este sentido, durante la temporada de lluvias el suelo se puede saturar de agua, lo cual altera su estructura y puede afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo. En contraste, durante la temporada seca, la falta de agua puede disminuir la actividad biológica en el suelo y reducir su fertilidad. Además, eventos climáticos extremos como inundaciones o sequías pueden provocar cambios bruscos y repentinos en las propiedades del suelo, lo que puede tener un impacto negativo en el crecimiento del arroz y en el rendimiento final (figura 5.3).

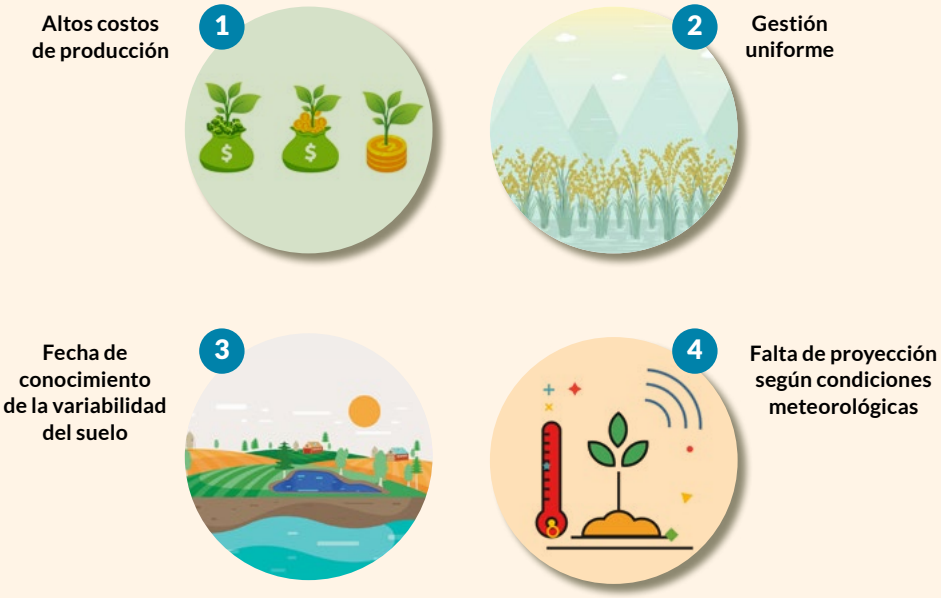


Figura 5.3. Principales problemas en el manejo agronómico.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.

La inestabilidad en el rendimiento es una característica común en los sistemas de cultivo de arroz, la cual es exacerbada por los altos costos de producción que genera la falta de conocimiento sobre cómo gestionar la variabilidad temporal y espacial de la relación entre factores abióticos (como el agua, el suelo y el clima) y bióticos (como las plagas y las enfermedades). En muchas regiones del país, a pesar de esta variabilidad, se ha adoptado un "enfoque de campo completo", donde cada lote, independiente de su tamaño, se maneja de forma uniforme, tratándolo como si fuera homogéneo en sus características (Srinivasan, 2006). Aunque este enfoque es relativamente fácil y rápido de implementar, presenta varias desventajas. Al no considerar la variabilidad del suelo, la topografía, las condiciones meteorológicas locales ni el uso del suelo, se generan ineficiencias en la aplicación de insumos, lo cual conlleva costos económicos elevados y efectos ambientales adversos, como la contaminación del agua por exceso de fertilizantes (Nawar et al., 2017).

En este contexto, la agricultura de precisión emerge como la estrategia más viable para afrontar estos desafíos y lograr una agricultura sostenible. Esta técnica se basa en la utilización de tecnologías avanzadas para mapear y monitorear la variabilidad del suelo y del clima, lo cual permite aplicar de forma localizada y específica los insumos agrícolas, como el agua, los fertilizantes y los pesticidas, de acuerdo con las necesidades precisas de cada zona dentro del campo (Bullock et al., 2007; Kravchenko & Bullock, 2002). La agricultura de precisión no solo mejora la eficiencia en el uso de los recursos, sino que también reduce el impacto ambiental porque minimiza la aplicación excesiva de insumos y previene la contaminación.

Las estrategias de agricultura de precisión han sido ampliamente adoptadas en sistemas de monocultivo, donde la homogeneidad del cultivo facilita la implementación de técnicas avanzadas de manejo. Sin embargo, su uso en sistemas de cultivo rotacional, donde se alternan diferentes tipos de cultivos, ha recibido menos atención debido a la mayor complejidad que implica manejar la heterogeneidad del suelo y del cultivo en el tiempo y el espacio (Ouazaa et al., 2022). A pesar de estos desafíos, la integración de la agricultura de precisión en siste-

mas de cultivo rotacional podría ofrecer importantes beneficios, como mejorar la sostenibilidad del sistema agrícola y el uso de los insumos.

En síntesis, capturar la variabilidad espaciotemporal del suelo es esencial para optimizar las prácticas agrícolas, lo cual se logra a través de una combinación de métodos tradicionales y avanzados (figura 5.4). El análisis del suelo, ya sea mediante muestreo en cuadrícula o dirigido, permite analizar propiedades clave como pH y contenido de nutrientes. Los sensores de proximidad, como los electromagnéticos y de reflectancia espectral, miden la conductividad eléctrica y otras características del suelo, mientras que la teledetección, mediante imágenes satelitales, drones y LIDAR, proporciona datos multiespectrales y topográficos para identificar variaciones espaciales y temporales. Los modelos geoestadísticos y dinámicos de suelo-cultivo permiten predecir y simular cambios en el suelo, al tiempo que son complementados por el mapeo digital para integrar múltiples fuentes de datos (Chaali et al., 2022). La tecnología IoT (internet de las cosas), con redes de sensores inalámbricos, facilita el monitoreo continuo en tiempo real, mientras que la georreferenciación con GPS asegura la precisión para crear mapas detallados. Estos enfoques combinados proporcionan una comprensión profunda de la variabilidad del suelo, crucial para la toma de decisiones informadas y la sostenibilidad agrícola.

Como se explicó en capítulos anteriores, el riego es un factor determinante para el rendimiento del cultivo de arroz. Los estudios muestran que el arroz irrigado tiene un rendimiento promedio significativamente mayor (6,6 t/ha) en comparación con el arroz de secano (4,9 t/ha), lo cual subraya la importancia de realizar una gestión adecuada del agua (González & Alonso, 2016). Sin embargo, en las técnicas de riego convencionales, como la distribución en cascada, se aplica agua de manera uniforme en todo el campo, sin considerar la variabilidad del suelo, los requerimientos específicos de agua del cultivo o las condiciones ambientales (Massey et al., 2022). Por tal razón, este enfoque puede conducir a una aplicación excesiva de agua en algunas áreas y a un déficit en otras, lo cual resulta en prácticas agrícolas ineficientes y en la pérdida de recursos hídricos.

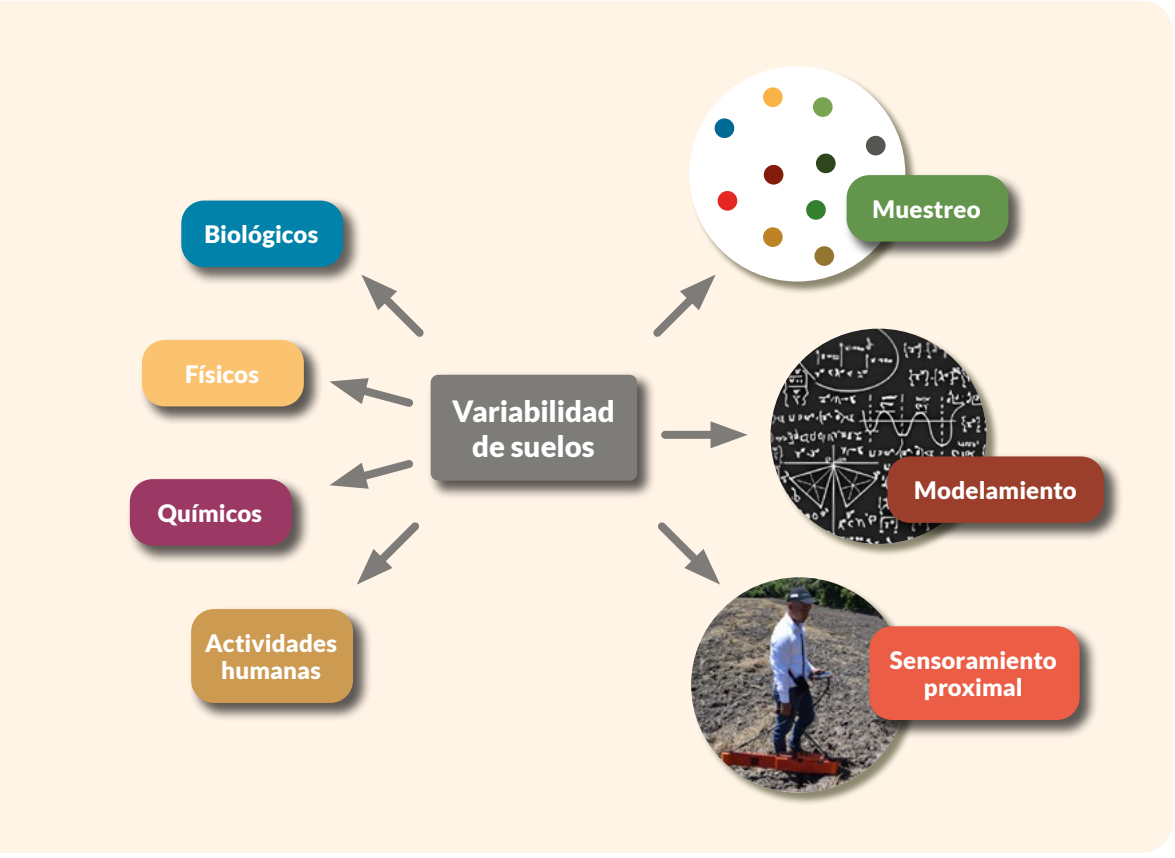


Figura 5.4. Factores y métodos para el estudio de la variabilidad de los suelos.

Fuente: Elaboración propia.

Fotos: John Edinson Calderón-Carvajal.

Dada la creciente presión del cambio climático, que se espera reduzca en 60 % el área de tierra adecuada para el cultivo de arroz en Colombia debido a alteraciones en los patrones de precipitación, es crucial implementar sistemas de riego adaptados que respondan a la variabilidad del suelo y a las condiciones climáticas locales. Esto no solo optimizaría el uso del agua, un recurso cada vez más escaso, sino que también ayudaría a mitigar los impactos negativos del cambio climático en la producción de arroz.

En este sentido, la comprensión y el manejo adecuado de la variabilidad temporal y espacial de las propiedades del suelo son esenciales para mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo de arroz. A través de la adopción de la agricultura de precisión y la implementación de sistemas de riego adaptados, los agricultores pueden superar los desafíos asociados con la variabilidad del suelo y el cambio climático, optimizando el uso de recursos y minimizando el impacto ambiental. Este enfoque integrado no solo mejorará el rendimiento del arroz, sino que también contribuirá a la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas en las regiones productoras de arroz (figura 5.5).

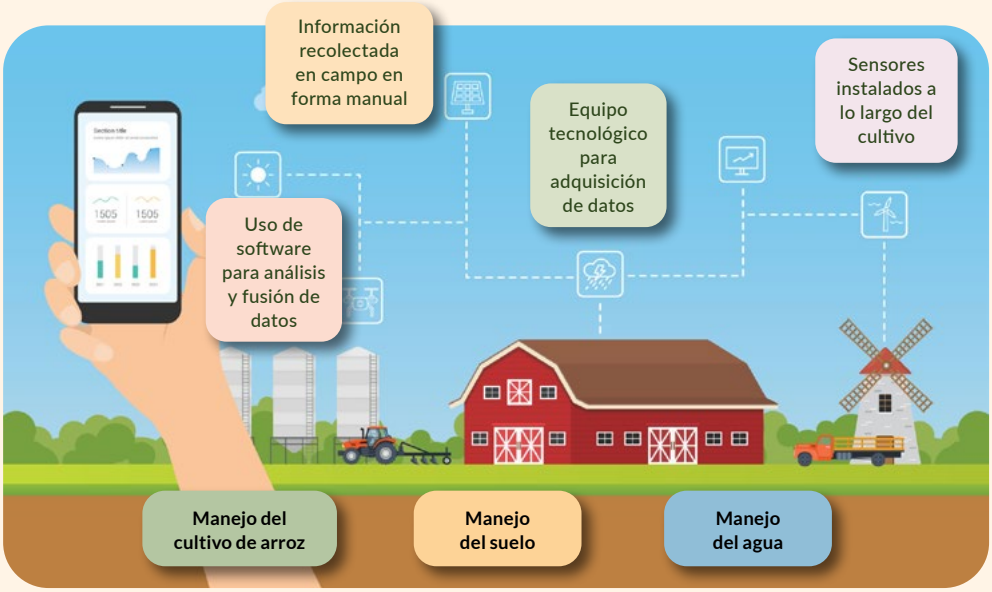


Figura 5.5. Tecnologías y estrategias integradas para el manejo del cultivo del arroz.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.

Zonas de manejo

Las zonas de manejo (ZM) son secciones del lote con características similares (topografía, textura, estado hídrico, etc.) (Lark & Stafford, 1997). La implementación de esas ZM es una alternativa de agricultura de precisión eficaz a las aplicaciones de dosis uniformes de insumos en función de varios factores como el rendimiento (Buttafuoco et al., 2017), para este caso particular del cultivo de arroz.

Específicamente, para delimitar las ZM es necesario realizar un estudio del suelo y contar con información sobre el manejo agronómico, mapas de rendimiento, topografía, datos de teledetección y conductividad eléctrica aparente del suelo (Bellvert et al., 2012; Gavioli et al., 2019; Liu et al., 2018; Ohana-Levi et al., 2019; Scudiero et al., 2018). Asimismo, los aspectos que se tienen en cuenta para definir las ZM se basan en información inicial del lote, variables o factores que influyen (figura 5.6), métodos para analizar la variabilidad, métodos de clasificación y número de zonas (Fridgen et al., 2004).

La división de los campos de producción de arroz en ZM puede optimizar la fertilidad del suelo y el manejo del riego (Mulla, 1989). Por lo tanto, las variables que influyen o se correlacionan con la disponibilidad de nutrientes del suelo y las propiedades hidráulicas deben considerarse en la delineación de las ZM. Algunos investigadores recomiendan usar variables que estén correlacionadas con el rendimiento y que sean estables y predecibles en el tiempo (Li et al., 2013).



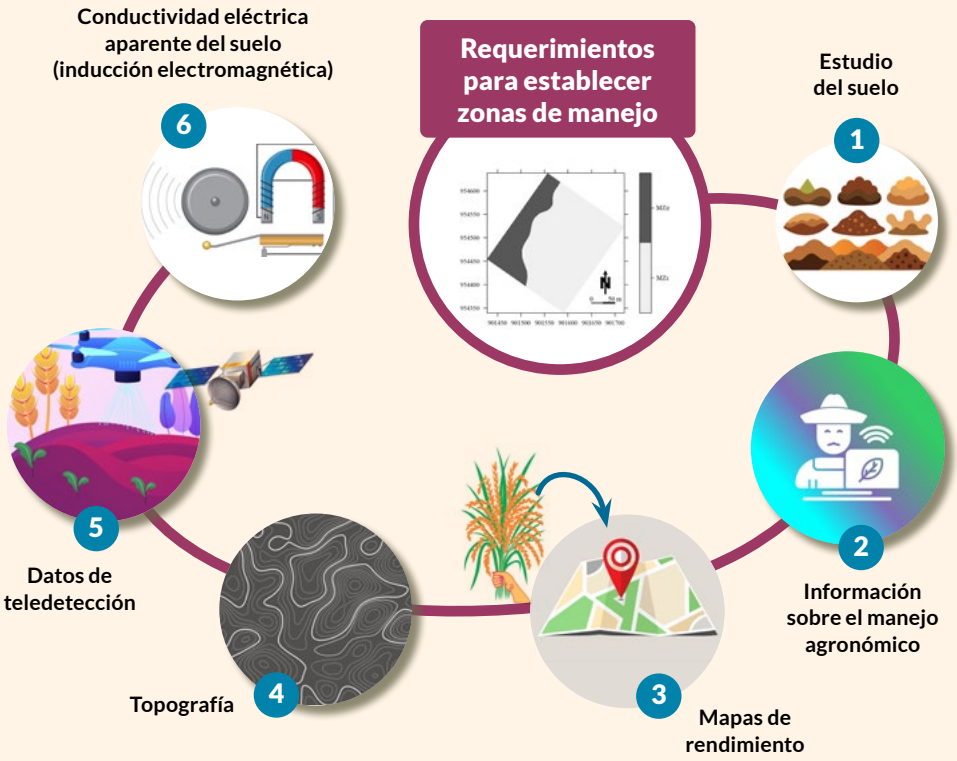


Figura 5.6. Requerimientos para establecer zonas de manejo.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.

La delineación de las ZM puede lograrse mediante dos enfoques: el empírico y el análisis de conglomerados (Li et al., 2007; Xiang et al., 2007), aunque cada método tiene varias desventajas en términos de precisión y aplicabilidad. Por una parte, los métodos empíricos se basan en el conocimiento del agricultor para identificar las ZM en función del potencial de rendimiento u otras características que lo afectan (Fleming et al., 2000; Schenatto et al., 2017). Estos enfoques son más sencillos y están sujetos a decisiones subjetivas. Por otra parte, los métodos de clúster, que son más complejos, tienen como objetivo dividir el campo agrícola en grupos —que también se denominan *clúster*— empleando una función de evaluación de similitud para esta división, lo cual

permite hacer una mayor diferenciación entre clases (Boydell & McBratney, 2002). En particular, los métodos de *clustering* permiten una mayor diferenciación utilizando criterios menos subjetivos (Gavioli et al., 2019) y a veces solo se emplea una variable para agrupar los sitios, aunque lo más habitual es hacer un análisis multivariante (Paccioretti et al., 2020). Una vez se definen las ZM, se pueden mejorar e implementar varias prácticas dentro del cultivo, como se explica en la figura 5.7.

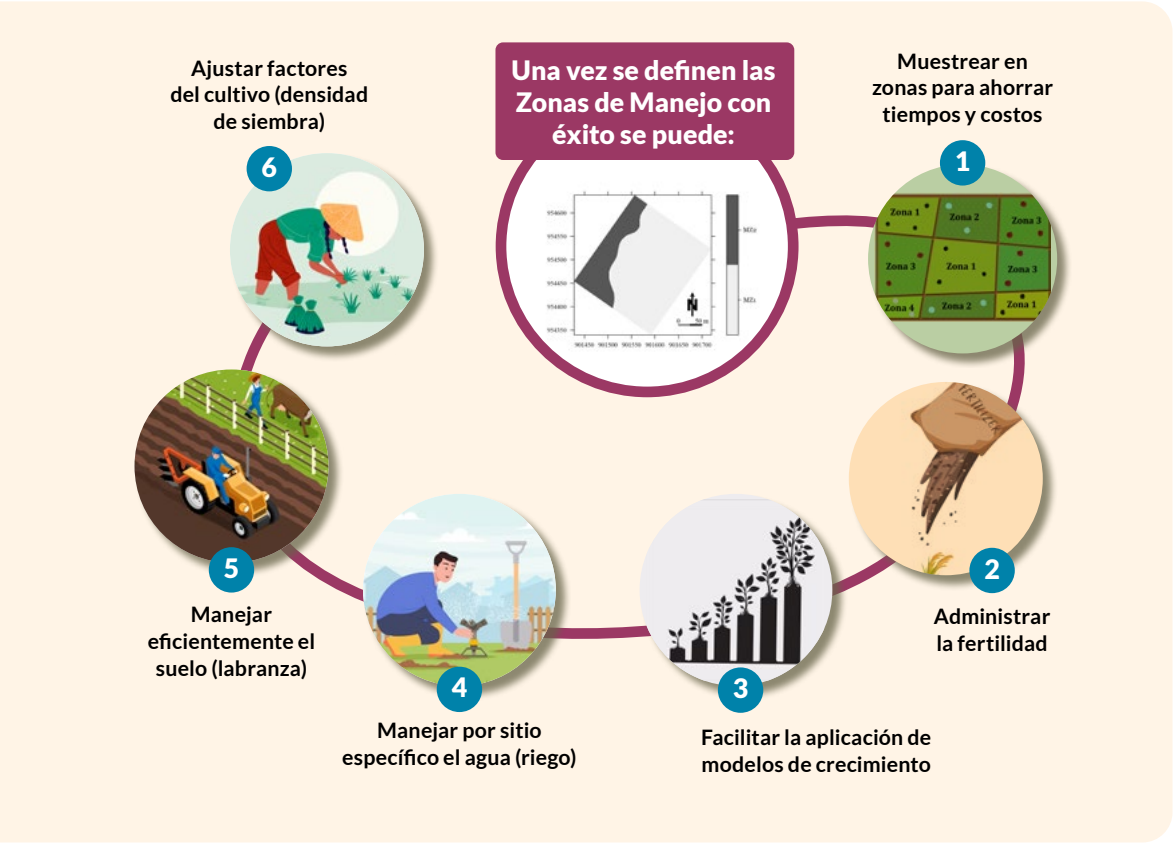


Figura 5.7. Beneficios de definir zonas de manejo por sitio específico en el cultivo del arroz.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Vecteezy.com.



6

Plagas y enfermedades de importancia económica para el cultivo de arroz y su manejo

Ángela María **Vargas-Berdugo**
Juan Felipe **Vélez-González**

Introducción

Las plagas y enfermedades se definen de manera general como las limitantes bióticas de los cultivos. En cumplimiento de su ciclo biológico, los agentes causales de enfermedad o artrópodos plaga se alimentan o colonizan el interior o la superficie de la planta, es decir, emplean el cultivo como recurso metabólico. Como consecuencia, alteran el equilibrio fisiológico de la planta y, por tanto, su desarrollo normal, a tal punto que afectan el rendimiento promedio del cultivo cuando se salen de control.

Entre las limitantes que afectan el cultivo de arroz se pueden encontrar insectos, hongos, virus y bacterias (Heinrichs & Muniappan, 2017). Al igual que las plantas, los insectos plaga y los patógenos causantes de enfermedades son susceptibles a las variaciones en temperatura, humedad relativa del ambiente, precipitaciones, entre otras variables. Además, establecen una relación directa con la planta o huésped para multiplicarse y propagarse, ya sea a través del suelo, mediante un insecto vector, entre otros (Skendžić et al., 2021). Por esta razón es fundamental implementar un manejo integrado que se base en las principales limitantes bióticas reportadas en Colombia para el cultivo de arroz, sus efectos sobre este y los mecanismos o prácticas existentes para controlarlas. A continuación, se describirán los insectos plaga y los microorganismos causantes de las enfermedades más limitantes en el cultivo de arroz reportados actualmente en Colombia.

Plagas

Como en todo sistema agrícola, la productividad del arroz está amenazada por una variedad de plagas que pueden causar pérdidas significativas en el rendimiento y la calidad del grano. Las plagas del arroz abarcan desde insectos que afectan las raíces, los tallos, las hojas y los granos, hasta vectores de enfermedades virales que deterioran la salud de las plantas. Su presencia y severidad dependen de diversos factores, como el clima, las prácticas agrícolas y la variedad cultivada, lo cual hace indispensable implementar un manejo adecuado y particular para cada situación (Meneses, 2008).

Específicamente, las principales plagas que afectan el cultivo del arroz en el VCAM son similares a las de otras áreas tropicales, pero con particularidades que son influidas por las condiciones climáticas cálidas y la humedad típica de la zona (Fedearroz, 2020). A continuación, se describen las plagas más importantes para esta región.

Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*)

El gusano cogollero, *Spodoptera frugiperda*, es una de las plagas más destructivas en los cultivos de arroz y otros cereales en América, especialmente en áreas tropicales y subtropicales (figura 6.1). Esta plaga es altamente polífaga, es decir, puede alimentarse de una gran variedad de cultivos, incluyendo el maíz, el sorgo, el trigo y el arroz. Su capacidad de adaptación, voracidad y rápida reproducción la convierten en una amenaza significativa para la agricultura. En el arroz, el gusano cogollero ataca principalmente el cogollo y causa graves daños en las plántulas y en las fases vegetativas del cultivo (Tay et al., 2023).



Figura 6.1. Daño ocasionado por *Spodoptera frugiperda* en maíz.
Foto: Juan Felipe Vélez González.

Descripción y ciclo de vida

El gusano cogollero pertenece al orden Lepidoptera y a la familia Noctuidae. Los adultos son mariposas de color marrón oscuro con alas anteriores moteadas, mientras que las alas posteriores son de un color blanco grisáceo con bordes oscuros. Las hembras ponen de 1.000 a 2.000 huevos en masas sobre las hojas de las plantas hospedantes (Tay et al., 2023).

El ciclo de vida de *Spodoptera frugiperda* se compone de cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto. Las larvas recién emergidas son pequeñas, de color verde pálido, pero a medida que crecen, cambian de color a tonos más oscuros, con líneas longitudinales en el dorso. En su etapa larval, la plaga atraviesa seis instares, y es en las últimas etapas donde causa el mayor daño al cultivo, ya que las larvas son más grandes y voraces (Hardke et al., 2015).

El ciclo completo, desde huevo hasta adulto, puede completarse en aproximadamente 30 días en condiciones favorables de temperatura y humedad. Esta capacidad de reproducción rápida permite que las poblaciones crezcan rápidamente y causen daños severos en poco tiempo (figura 6.2) (Tay et al., 2023).



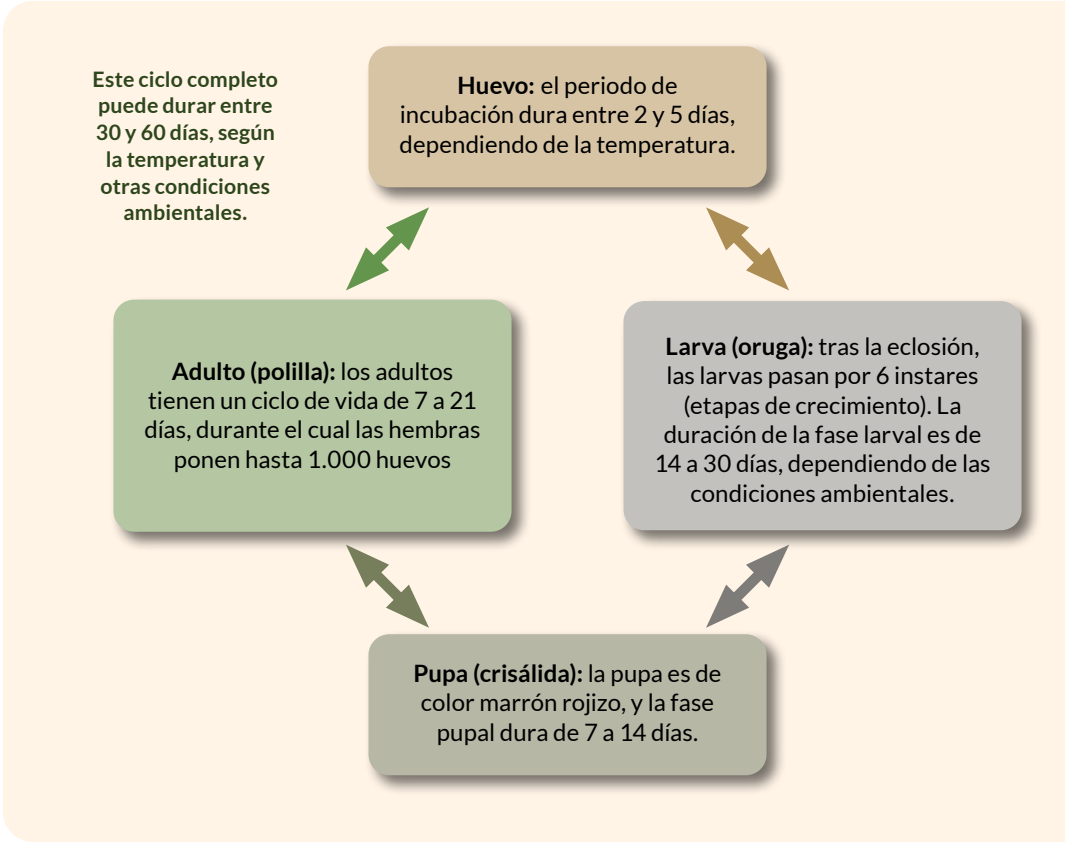


Figura 6.2. Ciclo de vida de *Spodoptera frugiperda*.
Fuente: Elaboración propia.

Daños en el cultivo de arroz

El gusano cogollero es especialmente dañino en las etapas vegetativas tempranas del arroz. Las larvas se alimentan de las hojas tiernas y el cogollo de la planta, de manera que destruyen el tejido foliar y causan daños que pueden llevar a la muerte de las plantas jóvenes o reducir su capacidad de crecimiento y desarrollo (Barrios et al., 2019). A continuación, se presentan los principales daños de este gusano al cultivo de arroz:

- Daños en el cogollo: en arroz, el gusano se alimenta principalmente del cogollo. Como consecuencia, causa el "síntoma de cogollo muerto", donde las hojas jóvenes no pueden desplegarse adecuadamente y se observan perforaciones irregulares. Este daño puede disminuir drásticamente la capacidad fotosintética de la planta y, por lo tanto, afectar su rendimiento (Barrios et al., 2019).
- Daños en etapas posteriores: en ataques severos, el gusano cogollero puede alimentarse de los tallos y las espigas en formación, lo cual impacta tanto la calidad como la cantidad del grano cosechado. Si el ataque se produce durante la etapa de floración, los daños pueden llegar a ser irreversibles (Tay et al., 2023).

Manejo y control

Las principales estrategias para mitigar el efecto de este insecto plaga se agrupan en el Manejo Integrado de Plagas (MIP) y el control químico, las cuales se describen a continuación.

Manejo Integrado de Plagas (MIP)

El control efectivo de *Spodoptera frugiperda* requiere una combinación de prácticas de manejo cultural, biológico y químico. Específicamente, el MIP es una estrategia que reduce el impacto ambiental y limita la resistencia de la plaga a los pesticidas (Barrios et al., 2019). En términos generales, consiste en las siguientes actividades:

- Monitoreo y detección temprana: es fundamental realizar monitoreos frecuentes del cultivo para detectar las primeras etapas del gusano cogollero y aplicar controles oportunos. Además, instalar trampas de feromonas puede ser útil para monitorear la población adulta.
- Rotación de cultivos: la rotación de cultivos interrumpe el ciclo de vida del gusano, ya que lo priva de sus plantas hospedantes favoritas.

- Control biológico: se recomienda fomentar el uso de depredadores y parasitoides naturales, como las avispas del género *Trichogramma*, las cuales parasitan los huevos del gusano cogollero, y depredadores como los crisópidos y coccinélidos, que se alimentan de las larvas.
- Plantas trampa: el uso de plantas trampa puede ayudar a atraer a las mariposas adultas lejos del arroz, donde las larvas pueden ser controladas de manera más efectiva (Barrios et al., 2019).
- Control químico: Para hacer control químico de *Spodoptera frugiperda* se recomienda usar insecticidas como clorantraniliprol, lufenurón, indoxacarb, spinosad y, con restricciones, clorpirifos. Estos productos son eficaces en las primeras fases larvales y deben alternarse para evitar la resistencia de la plaga. Es importante aplicarlos con buena cobertura, especialmente en el cogollo, y combinar su uso con prácticas de MIP, como biocontroladores y técnicas culturales. El monitoreo regular es clave para aplicar los productos solo cuando se superen los umbrales económicos de daño (Paredes-Sánchez et al., 2021).

Chinche del arroz (*Oebalus insularis*)

El chinche del arroz, *Oebalus insularis*, es una de las plagas más importantes del cultivo de arroz en zonas tropicales y subtropicales, principalmente en América Latina. Este insecto es un verdadero hemíptero de la familia Pentatomidae, y es conocido por causar daños directos e indirectos en las espigas de arroz en formación y durante la fase de maduración del grano. Para alimentarse succiona los nutrientes de los granos en desarrollo, lo cual provoca una reducción significativa en la calidad y el rendimiento del grano cosechado. Además, el chinche del arroz puede causar el "manchado del grano", que afecta su valor comercial (Zachrisson et al., 2014).

Descripción y ciclo de vida

Oebalus insularis es una chinche de tamaño mediano, de aproximadamente 8 mm a 10 mm de longitud. Los adultos presentan un color amarillo o marrón

claro, con manchas negras en la parte dorsal del abdomen. Las ninfas tienen un cuerpo más redondeado y carecen de alas, con colores que varían del rojo al marrón oscuro a medida que crecen.

El ciclo de vida del chinche del arroz incluye cuatro fases: huevo, ninfa, pupa y adulto. Las hembras depositan los huevos en masas sobre las hojas, espigas y vainas del arroz, donde las ninfas emergen después de 5 a 10 días. A partir de ese momento, pasan por cinco instares antes de convertirse en adultos, lo cual les toma entre 20 y 30 días, dependiendo de las condiciones ambientales. Los adultos pueden vivir varios meses y, durante ese tiempo, causan daños severos al arroz porque se alimentan directamente de los granos (figura 6.3) (Mero et al., 2024).

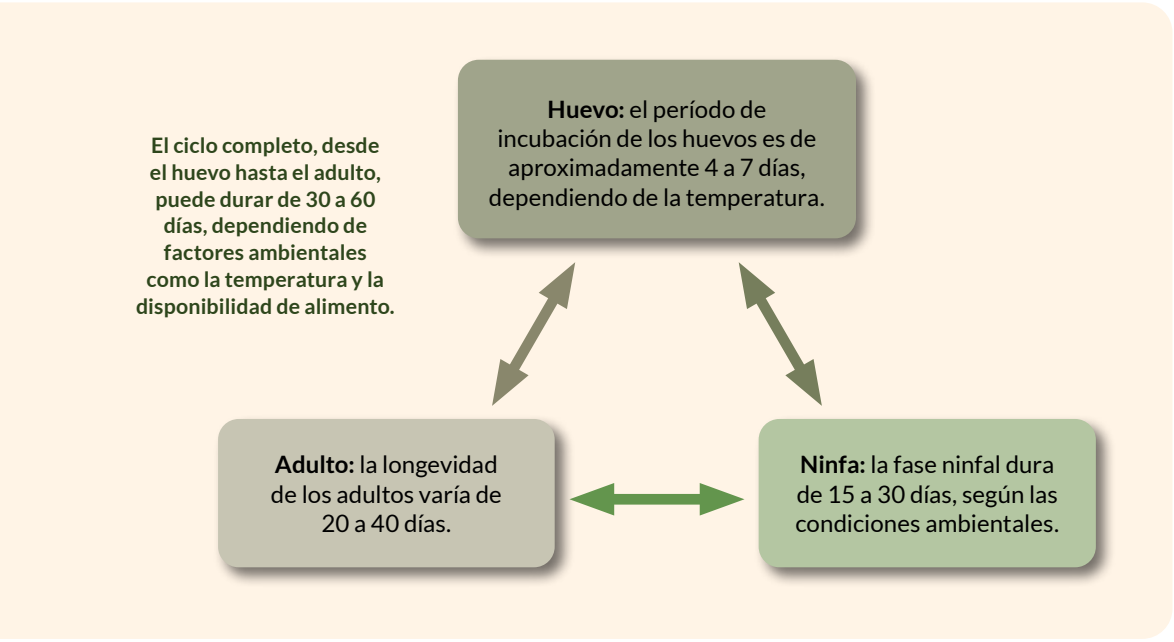


Figura 6.3. Ciclo de vida de *Oebalus insularis*.

Fuente: Elaboración propia.

Daños en el cultivo de arroz

El chinche del arroz se alimenta principalmente de las espigas en formación y maduración, lo cual puede ocasionar varios problemas:

- **Pérdida de calidad de grano:** el daño más común causado por *Oebalus insularis* es el "manchado del grano". Cuando los adultos o ninfas perforan el grano para alimentarse, inyectan enzimas que descomponen el almidón, lo cual provoca manchas oscuras en los granos y reduce su calidad. El grano dañado por el chinche del arroz es menos deseable para los mercados, ya que afecta la apariencia y la calidad del arroz pulido (figura 6.4).



Figura 6.4. Daño ocasionado por *Oebalus insularis* en grano.
Foto: Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios.

- **Pérdida de rendimiento:** el ataque de *Oebalus insularis* durante la fase de llenado de los granos provoca que sean malformados o estériles, lo cual reduce el peso de la cosecha. Si el ataque ocurre en la fase de maduración, los granos se ven más propensos a romperse durante el proceso de molienda, lo que disminuye aún más el rendimiento.

- **Otros daños:** en casos de infestaciones severas, el chinche puede causar la caída de las espigas y la decoloración del follaje, lo cual debilita la planta y reduce su capacidad de producir granos de alta calidad.

Manejo y control

En este apartado se describen las estrategias para mitigar el impacto del chinche del arroz, las cuales consisten en implementar un Manejo Integrado de Plagas (MIP) y hacer control químico.

Manejo Integrado de Plagas (MIP)

La gestión de *Oebalus insularis* se debe basar en un enfoque integrado que incluya el monitoreo y el control cultural, biológico y químico. En particular, el MIP, esencial para minimizar los daños y preservar la productividad del arroz, consiste en realizar las siguientes actividades.

- **Monitoreo:** es fundamental realizar un monitoreo constante en los campos de arroz, especialmente durante las fases críticas de floración y llenado del grano. Además, se deben usar trampas para capturar los adultos y evaluar el nivel de infestación, pues esto permite aplicar los controles en el momento oportuno.
- **Control biológico:** fomentar los enemigos naturales de *Oebalus insularis*, como las avispas parasitoides (géneros *Trissolcus* y *Telenomus*), y los depredadores, como las arañas y algunos hemípteros, puede ayudar a reducir la población de chinches en el campo. También se han estudiado hongos entomopatógenos, como *Beauveria bassiana*, y de aceites esenciales para hacer control biológico de *Oebalus insularis* (Zachrisson et al., 2019).
- **Prácticas culturales:** la rotación de cultivos y la eliminación de restos de cosechas después de la recolección son prácticas fundamentales para evitar que el chinche del arroz encuentre refugio y alimento. Además, la siembra escalonada puede ayudar a reducir la presión de infestación, ya que interrumpe la continuidad del ciclo de vida del insecto.

- Control químico: Para el control químico del chinche del arroz se recomiendan insecticidas como lambda-cihalotrina y beta-ciflutrina, ambos piretroides de amplio espectro, eficaces por contacto e ingestión, especialmente durante la fase de llenado de grano. También se puede usar thiamethoxam, un neonicotinoide sistémico adecuado para etapas tempranas de infestación, y carbaryl, un carbamato eficaz en poblaciones elevadas. El uso de clorpirifos es posible, pero debe manejarse con cuidado debido a su alta toxicidad. Además, es esencial alternar los productos para evitar la resistencia y combinarlos con el monitoreo y el manejo integrado del cultivo (Cherry et al., 2018).

Polilla blanca del arroz (*Rupela albinella* Cramer)

Rupela albinella, comúnmente conocida como la polilla blanca del arroz, es una de las principales plagas que afectan los cultivos de arroz en regiones tropicales y subtropicales. Este insecto lepidóptero pertenece a la familia Crambidae y está ampliamente distribuido en América Latina, donde causa daños graves en el rendimiento del arroz al atacar los tallos de las plantas. Las larvas de *Rupela albinella* se alimentan del tejido interno de los tallos, de manera que debilita las plantas y reduce su capacidad para producir granos de alta calidad (Castro, 2011).

Descripción y ciclo de vida

El adulto de *Rupela albinella* es una pequeña polilla de color blanco plateado con una envergadura de aproximadamente 20 mm a 25 mm (figura 6.5). Las hembras suelen ser más grandes que los machos, y los adultos tienen una vida corta, de entre 3 y 7 días. Las hembras depositan los huevos en las hojas del arroz y, una vez que eclosionan, las larvas penetran en los tallos para alimentarse del tejido interno. El ciclo de vida de *Rupela albinella* incluye cuatro fases principales: huevo, larva, pupa y adulto. El estado larval es el más destructivo, ya que las larvas barren el tejido interno de los tallos, lo cual provoca que las

plantas colapsen. Las larvas pasan por cinco estadios larvales antes de convertirse en pupas dentro del tallo dañado. El ciclo completo de vida, dependiendo de las condiciones climáticas, puede durar entre 30 y 40 días (Castro, 2011).



Figura 6.5. Adulto de *Rupela albinella*.
Foto: Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios.

Daños en el cultivo de arroz

El daño causado por *Rupela albinella* es principalmente interno, razón por la cual es una plaga difícil de detectar en las primeras etapas de infestación. Entre los principales efectos al cultivo de arroz se encuentran:

- Daño interno del tallo: las larvas se alimentan del interior del tallo, de manera que dañan los tejidos vasculares de la planta. Esto interrumpe el flujo de nutrientes y agua, lo cual debilita la planta y provoca un crecimiento deficiente. El daño es visible externamente cuando las hojas de las plantas afectadas se vuelven amarillas y se secan, o cuando los tallos colapsan.
- Pérdida de rendimiento: si la infestación ocurre en las primeras etapas de crecimiento, las plantas afectadas no pueden producir espigas viables, lo

que conduce a pérdidas significativas de rendimiento. Además, las plantas infestadas en fases más avanzadas del desarrollo pueden producir espigas estériles o malformadas, lo cual reduce aún más la calidad y cantidad del grano cosechado (Pantoja et al., 1994).

Manejo y control

En este apartado se describen las estrategias para mitigar el impacto de la polilla blanca del arroz, las cuales consisten en implementar un Manejo Integrado de Plagas (MIP) y hacer control químico.

Manejo Integrado de Plagas (MIP)

Un enfoque de MIP, esencial para controlar eficazmente las poblaciones de *Rupela albinella*, incluye monitoreo, control biológico, prácticas culturales y control químico.

- **Monitoreo:** la detección temprana es crucial para controlar la polilla blanca del arroz. Se deben realizar inspecciones periódicas de los campos, prestando atención a los signos de daño en los tallos y al color amarillento de las hojas. También se pueden utilizar trampas de feromonas para monitorear la presencia de adultos.
- **Control biológico:** los enemigos naturales de *Rupela albinella* incluyen parasitoides de huevos y larvas, como avispas del género *Trichogramma* y hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana*, que pueden ayudar a reducir las poblaciones larvales en el campo.
- **Prácticas culturales:** la eliminación de restos de cosecha y la rotación de cultivos son prácticas esenciales para evitar que las larvas de *Rupela albinella* sobrevivan en el campo entre temporadas de cultivo. El riego de los campos después de la cosecha también puede ayudar a reducir las poblaciones de larvas (De Souza et al., 2022).

- **Control químico:** Para hacer el control químico de la polilla blanca del arroz se recomiendan insecticidas como clorantraniliprol, que actúa sobre las larvas paralizándolas, y lambda-cihalotrina, un piretroide de amplio espectro eficaz por contacto e ingestión. También es útil el teflubenzurón, que inhibe el crecimiento larval, e indoxacarb, que bloquea los canales de sodio de las larvas y, en consecuencia, provoca su muerte. El uso de clorpirifos es posible, aunque con precauciones debido a su toxicidad. Es esencial aplicar estos productos en las primeras fases larvales y alternar modos de acción para prevenir resistencias, complementando con manejo integrado del cultivo (De Souza et al., 2022).

Sogata (*Tagosodes orizicolus*)

La sogata, científicamente conocida como *Tagosodes orizicolus*, es un insecto perteneciente a la familia Delphacidae y se considera una de las plagas más dañinas del cultivo de arroz, especialmente en las regiones tropicales y subtropicales. Este insecto se destaca por su capacidad para causar daños significativos a las plantas de arroz a través de su alimentación, que afecta tanto el crecimiento como el rendimiento de los cultivos (figura 6.6) (Mariani et al., 2015).



Figura 6.6. Adulto de *Tagosodes orizicolus*.

Foto: Ángela María Vargas.

Descripción y ciclo de vida

El adulto de *Tagosodes orizicolus* es un saltamontes de tamaño pequeño a mediano, con un cuerpo aplanado y color verde claro o marrón. Tiene alas largas que le permiten saltar y volar cortas distancias. La longitud del cuerpo puede variar entre 3 mm y 4 mm.

El ciclo de vida de la sogata comprende cuatro etapas: huevo, ninfa, pupa y adulto. Las hembras depositan sus huevos en las hojas de las plantas de arroz, y tras un período de incubación de aproximadamente 7 a 10 días, emergen las ninfas, que pasan por varios estadios antes de convertirse en adultos. El ciclo de vida completo puede durar entre 30 y 40 días, dependiendo de las condiciones ambientales (Mariani et al., 2015).

Daños en el cultivo de arroz

Los daños causados por *Tagosodes orizicolus* son principalmente el resultado de su alimentación:

- **Alimentación de savia:** las ninfas y los adultos se alimentan de la savia de las plantas, de las cuales extraen nutrientes esenciales. Este daño causa amarillamiento en las hojas, disminuye la fotosíntesis y reduce el crecimiento general de la planta. Las hojas afectadas presentan clorosis y pueden llegar a marchitarse.
- **Reducción de rendimiento:** la presencia de la sogata puede resultar en pérdidas de rendimiento de hasta el 50 %. Además, las plantas debilitadas son más susceptibles a enfermedades y otros estreses ambientales, lo que agrava aún más la situación (Pardey-R et al., 1996).

Manejo y control

En este apartado se describen las estrategias para mitigar el impacto de la sogata, las cuales consisten en implementar un Manejo Integrado de Plagas (MIP) y hacer control químico.

Manejo Integrado de Plagas (MIP)

Para controlar la sogata de manera efectiva es fundamental implementar un enfoque de MIP que incluya diversas estrategias:

- **Monitoreo:** es esencial realizar inspecciones periódicas en los campos de arroz para detectar la presencia de *Tagosodes orizicolus*. El monitoreo regular permite identificar las infestaciones en etapas tempranas, lo cual facilita el control.
- **Control biológico:** la utilización de enemigos naturales, como parasitoides y depredadores, puede ayudar a mantener las poblaciones de sogata bajo control. Se ha observado que ciertas especies de avispas parasitoides son efectivas para regular las poblaciones de sogata.
- **Prácticas culturales:** la rotación de cultivos y la eliminación de residuos de cultivos son prácticas que pueden ayudar a reducir la presión de la infestación. Asimismo, implementar prácticas de saneamiento, como la limpieza de los campos y el control de malas hierbas, también es fundamental (Zachrisson, 2005).
- **Control químico:** Para hacer control químico del chinche del arroz se recomienda usar insecticidas como lambda-cihalotrina, un piretroide eficaz por contacto e ingestión contra adultos y ninfas; thiamethoxam, un neonicotinoide sistémico que actúa en larvas y adultos, e imidacloprid, que también afecta el sistema nervioso de los insectos. Asimismo, el clorantraniliprol, de la clase de las diamidas antranílicas, es efectivo contra larvas, mientras que bifentrina, otro piretroide, proporciona un buen control por contacto e ingestión. Es crucial aplicar estos productos cuando se detecten poblaciones significativas de la plaga, especialmente en los primeros estadios de desarrollo, alternando entre ellos para prevenir la resistencia y complementando el control químico con prácticas de manejo integrado, como el monitoreo regular y la eliminación de refugios en el cultivo (Cabanillas, 2018).

Enfermedades

La productividad del arroz también puede ser afectada negativamente por una variedad de patógenos que generan pérdidas significativas en el rendimiento y la calidad del grano. Este subcapítulo aborda de manera integral las principales enfermedades que afectan al arroz en el VCAM, las cuales han sido clasificadas según el tipo de patógeno involucrado y el órgano afectado, con especial atención a aquellas causadas por hongos y bacterias. Para cada una de las patologías abordadas, se detallan los síntomas y las estrategias de manejo integrado, con un enfoque técnico y práctico orientado a la prevención, el diagnóstico oportuno y el control eficiente en campo.

Enfermedades asociadas a hongos presentes en el suelo

En esta sección se presentan las enfermedades asociadas a hongos que generalmente se encuentran en el suelo, como *Rhizoctonia solani* y *Gaeumannomyces graminis*, los cuales ocasionan daños en las vainas, raíces y tallos, lo que compromete el anclaje, la nutrición de la planta y el llenado de grano.

Añublo de la vaina (hongo *Rhizoctonia solani*)

El tizón de la vaina del arroz es una enfermedad causada por el patógeno *Rhizoctonia solani*, una de las principales limitantes sanitarias del cultivo de arroz. Por lo tanto, a continuación se describen las principales características y aspectos que se deben tener en cuenta para el monitoreo y control de este patógeno.

Características generales del patógeno o agente causal

Rhizoctonia es un hongo habitante natural del suelo. Aunque los géneros que pertenecen a esta especie cumplen diferentes funciones ecológicas, la mayoría es considerada patógena de plantas, pues al colonizarlas ocasionan enfermedad (Ogoshi,1996). Específicamente, la especie *Rhizoctonia solani* causante del

añublo del arroz pertenece al grupo de los Basidiomycota. Su fase de reproducción asexual o anamorfa recibe el nombre de *Rhizoctonia solani* Kühn, y su fase de reproducción sexual o telomorfo recibe el nombre de *Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk., no obstante, se trata del mismo patógeno (Aydın, 2022).

Este hongo tiene la capacidad de colonizar y ocasionar enfermedad en un amplio rango de especies de plantas. Una de sus ventajas adaptativas es su capacidad para sobrevivir en el suelo y residuos de plantas (Tsror, 2010). Además, cuando inicia su proceso de multiplicación, en el hospedero produce micelio blanco que, al compactarse, forma estructuras de coloración oscura denominadas *esclerocios* (figura 6.7). Estas corresponden con estructuras de reposo y resistencia, las cuales son de tamaño variable, pero de textura uniforme, y pueden permanecer latentes durante muchos años resistiendo las aplicaciones de moléculas de síntesis química (Takashi & Tadao, 1978).



Figura 6.7. Sintomatología en plantas de arroz ocasionada por *R. solani*
a. Daños en la panoja y granos; **b.** Daños en las macollas.
Fotos: Ángela María Vargas

Síntomas observados en las plantas y etapa de mayor susceptibilidad

Cuando las plantas de arroz se infectan, los síntomas principales que ocasiona *Rhizoctonia solani* pueden observarse de 24 a 72 horas después, dependiendo de las condiciones ambientales. De manera general, en la panícula, las hojas o los tallos se observan manchas ovoides o irregulares de color gris verdoso a verde oscuro cerca o en las vainas y láminas foliares (1-3 cm de largo), pero los síntomas también pueden localizarse en la parte inferior de las plantas del arroz. Además, el centro de las manchas se pone amarillo/gris/blanco antes de pasar a marrón.

Aunque la enfermedad puede aparecer en cualquier fase de crecimiento, el cultivo de arroz es más vulnerable durante el ahijamiento (Singh, Mazumdar, et al.). Específicamente, el micelio fúngico determina el tamaño y la forma de las lesiones, que se producen en manchas de diversos tamaños. En condiciones favorables, la infección puede extenderse a las vainas y láminas superiores de las hojas, lo que finalmente provoca la pudrición de la vaina de la hoja y la desecación de toda la hoja. En casos graves, la infección se extiende a la panícula, de manera que afecta el llenado del grano y provoca la decoloración de las semillas con manchas de color negro parduzco o manchas de color negro a gris ceniza (Hollier et al., 2009).

Finalmente, se debe tener en cuenta que la longitud y el diámetro de la hoja bandera, los días hasta el espigado y la densidad de siembra afectan la susceptibilidad del cultivo a la enfermedad. Asimismo, se ha observado que la altura de la planta muestra una fuerte asociación negativa con la longitud relativa de la lesión (Willocquet et al., 2012).

Prácticas de manejo

Para manejar este patógeno se pueden emplear prácticas de control químico, cultural y biológico, las cuales se describe a continuación:

- Manejo cultural: debido a que *Rhizoctonia solani* posee un amplio rango de especies hospederas, la eliminación oportuna de arvenses susceptibles y restos vegetales previene el crecimiento micelial y la formación de esclerocios. Además, la rotación de cultivos con hospedantes no susceptibles o tolerantes al patógeno dentro del sistema rotacional que existe en la región, como algodón o maíz, controla la multiplicación del hongo y disminuyen su inóculo en el suelo.

  También se debe ajustar la fertilización y los requerimientos nutricionales del cultivo con base en el análisis de suelos, de tal modo que dentro del manejo agronómico se realice la aplicación dividida y el uso de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta para aquellos lotes con alta presencia de la enfermedad, pues esto permite una reducción gradual de la infección. Al respecto es importante señalar que el efecto que tienen las aplicaciones excesivas de nitrógeno en la propagación de la enfermedad es mayor que el efecto de la densidad de siembra y espacio entre plantas (Zhang et al., 2016). Al igual que el nitrógeno, las dosis de fertilizantes fosforados aumentan la incidencia de la enfermedad, mientras que, en contraste, se ha observado que los fertilizantes potásicos la reducen (Sarkar et al., 2002).
- Manejo biológico: además del control químico y cultural, el control biológico permite prevenir la presencia del patógeno. El antagonismo con microorganismos es una propiedad común encontrada en hongos micoparásitos, como especies del género *Trichoderma* spp., y en algunos actinomicetos que pueden colonizar las raíces de las plantas y representan la mayor parte de la microflora de la rizosfera. En particular, se ha reportado que *Streptomyces* spp. reduce el crecimiento de *Rhizoctonia solani* hasta en 50 % y la presión de la enfermedad hasta en 63 % (Vurukonda et al., 2021).
- Manejo químico: en la actualidad, los fungicidas sistémicos del grupo de las estrobilurinas son el grupo químico preferido para tratar el tizón de la vaina del arroz. Los fungicidas del grupo de las estrobilurinas son derivados de β-metoxi acrilatos y se obtienen de hongos silvestres cultivados en bosques (*Strobilurus tenacellus*), entre los cuales la azoxistrobina de este grupo es muy eficaz para controlar la enfermedad. Además, los fungicidas triazol se utilizan habitualmente para controlar el añublo o el tizón de la vaina.

Mal del pie – mancha naranja (hongo *Gaeumannomyces graminis*)

El mal del pie, también conocido como mancha naranja, es una de las enfermedades de origen fúngico más agresivas que afecta la base del tallo y el sistema radical del cultivo de arroz. Es causada por el hongo *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis*, el cual compromete la salud y la integridad estructural de la planta. En esta sección del modelo productivo se presentarán factores clave para su comprensión, monitoreo y manejo agronómico para mitigar los daños en sistemas arroceros del VCAM.

Características generales del patógeno o agente causal

La podredumbre de la vaina de la corona, mal del pie o mancha naranja, es causada por un hongo del grupo de los Ascomycota, de la especie *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis*, el cual tiene la capacidad de infectar la base de las plantas del arroz. Como resultado de su colonización, ocasiona la maduración temprana de los granos, la muerte de los macollos y la reducción del rendimiento.

En las raíces, el hongo tiene la capacidad de colonizar inicialmente las células epidérmicas y exodérmicas, así como la esclerénquima. Después de 15 días de haber infectado la planta, las hifas del hongo pueden colonizar la corteza y producir peritecios (figura 6.8) en las raíces, desde donde se generan las ascosporas o propágulos, que corresponden a la principal estructura de propagación sexual y que permite su diseminación en el suelo. A los 25 días, continúa la colonización hacia las células del parénquima, los haces vasculares y los espacios aéreos. Los peritecios emergen a través de la base del profilio y de la primera vaina de la hoja a los 30 días (Hawerroth et al., 2017).

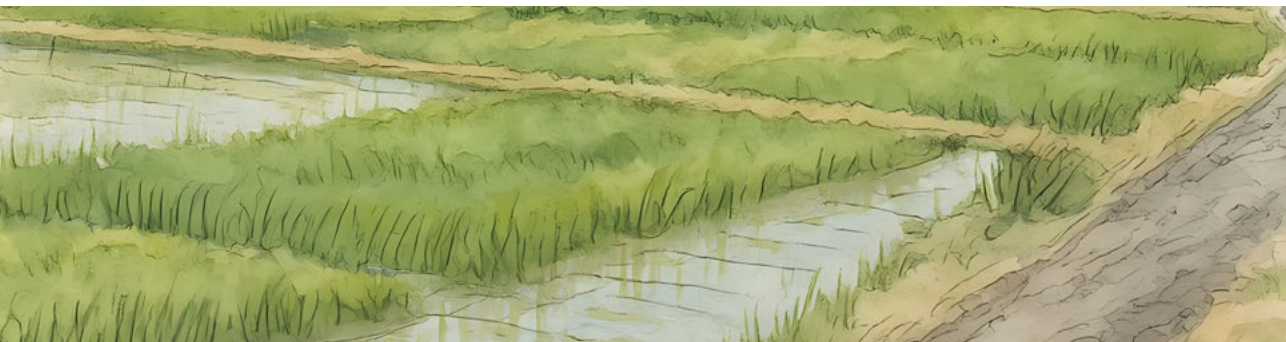




Figura 6.8. Síntomas ocasionados en la base de las plantas de arroz debido a la colonización de *Gaeumannomyces graminis*. **a.** Daños en estado intermedio; **b.** Daños en estado avanzado que se producen mediante la expansión de los propágulos liberados de los peritecios.

Fotos: Ángela María Vargas.

Síntomas observados en las plantas y etapa de mayor susceptibilidad

Gaeumannomyces graminis afecta las raíces en todas las etapas de crecimiento. Como resultado de la infección con este hongo, en las plantas maduras se observan inflorescencias muertas o decoloradas, mientras que la base de la planta presenta coloración negra, la cual está asociada a la producción de peritecios y necrosis o muerte del tejido y la base de la planta.

Como se mencionó anteriormente, este hongo puede afectar todas las etapas de desarrollo del cultivo (Freeman & Ward, 2004), pero los síntomas se observan generalmente durante el macollamiento. La presencia de este patógeno en el cultivo tiene gran relación con la existencia de peritecios en los suelos, pues liberan ascosporas que colonizan las plantas una vez se establece el cultivo y le impiden su desarrollo normal. Si ataca en estado de plántula, *Gaeumannomyces graminis* produce una pudrición del tallo (figura 6.8a) y las raíces, que genera plantas completamente improductivas (Peixoto et al., 2013).

Condiciones ambientales conducentes de la enfermedad

Las condiciones que promueven la proliferación de este hongo y el aumento de la enfermedad en el campo están relacionadas con suelos de poca actividad microbiológica, los cuales le hacen más fácil el acceso y la colonización de la base de las plantas en un corto período debido a que no enfrentan competencia microbiológica.

Además, el monocultivo constante en algunas regiones productoras del VCAM incrementa el inóculo en el suelo y, por lo tanto, permite la multiplicación de los peritecios, de donde salen los propágulos que infectan nuevas plantas y que se pueden mover a través del agua, donde encuentran la humedad y la temperatura adecuadas (entre 25 °C y 30 °C) para proliferar en los cultivos de arroz bajo inundación. También se debe tener en cuenta que la multiplicación de hongos es favorecida por suelos con un pH que tienda a la acidez y por la lenta descomposición de la materia orgánica asociada al tamo de la cosecha anterior de arroz. Finalmente, al igual que para *Rhizoctonia solani* y otras enfermedades foliares, el exceso de nitrógeno favorece la multiplicación del hongo en el tejido vegetal.

Mecanismos de diseminación

Pueden convertirse en hospederos alternos de este hongo plantas de arroz remanentes de cosecha, así como arvenses del grupo de las gramíneas, por ejemplo de los géneros *Leptochloa* sp., *Cynodon* sp., *Cholirs* sp. y *Pennisetum* sp., asociadas al cultivo de arroz. Además, si el suelo tiene altas concentraciones del patógeno, preparar el terreno o realizar otras labores favorece su diseminación de un lote a otro. En este mismo sentido, el agua de riego que va de un campo a otro también permite el movimiento de los hongos por las láminas de agua.

Manejo cultural, genético, químico o biológico

Una de las prácticas de manejo consiste en eliminar los residuos de cosecha haciendo el volteado de plantas, de tal manera que se evite la multiplicación del hongo en el suelo. También se recomienda rotar con un cultivo adaptado a la zona que no pertenezca al grupo de las gramíneas, ya que *Gaeumannomyces graminis* puede

colonizar un rango amplio de estas especies vegetales. De cualquier forma, en lotes con alta incidencia es importante contemplar la mejor estrategia de preparación del suelo que disminuya la diseminación de peritecios en el suelo.

Las mejores alternativas químicas son los fungicidas a base de cyproconazole o propiconazole aplicados al inicio del primordio y al embuchamiento del cultivo. Además, se sugiere hacer control biológico con especies nativas del género *Trichoderma* sp., cuya efectividad como micoparásito ha sido reportada (Mitra et al., 2023).

Enfermedades asociadas a síntomas foliares

A continuación, se abordan las enfermedades foliares (aquellas cuyos principales síntomas se evidencian en el tejido foliar). Entre ellas, sobresale el añublo causado por *Pyricularia oryzae*, debido al impacto económico en el cultivo de arroz.

Añublo o tizón de la vaina del arroz (hongos *Pyricularia oryzae / Magnaporthe oryzae*)

El añublo o tizón de la vaina es una enfermedad causada por *Pyricularia oryzae* (fase sexual *Magnaporthe oryzae*). Es una enfermedad fúngica que afecta a las hojas, tallos e inflorescencias del arroz. Se disemina por aire y agua, favorecida principalmente por condiciones cálidas y húmedas, y puede causar pérdidas de rendimiento. El hongo penetra los tejidos, genera lesiones y reduce drásticamente la calidad y cantidad del grano. En esta sección se abordan las principales características del patógeno y su relación con el hospedero, los síntomas más relevantes y las estrategias de manejo agronómico.

Características generales del patógeno o agente causal

Es un hongo que se transporta a través del aire, pues esporula de manera eficiente sobre la lámina foliar de las plantas de maíz. La especie *Pyricularia oryzae*

forma parte del grupo causante del añublo del arroz y pertenece al grupo de los Ascomycota. Específicamente, en su fase de reproducción asexual o anamorfa recibe el nombre de *Pyricularia oryzae* y en su fase de reproducción sexual o telomorfo se denomina *Magnaporthe oryzae*, no obstante, se trata del mismo patógeno (Klaubauf et al., 2014). *Pyricularia oryzae* ataca hojas, tallos, inflorescencias y ocasionalmente al grano, además es una enfermedad policíclica, es decir, puede tener varios ciclos de infección en el mismo ciclo de cultivo.

El hongo del añublo del arroz inicia su ciclo de infección cuando uno de sus propágulos o conidios se posa en la superficie de la hoja de la planta. La espora se adhiere a la cutícula hidrófoba, germina y produce un tubo germinal que se diferencia como un apresorio, el cual se melaniza y, por lo tanto, adquiere una fuerza física que le permite penetrar la cutícula e ingresar en la epidermis del arroz. La invasión del tejido vegetal se produce por medio de hifas. Finalmente, las lesiones que produce la enfermedad aparecen entre 72 y 96 horas después de la infección y la esporulación se produce en condiciones húmedas; los conidióforos aéreos con esporas son transportados a nuevas plantas huésped por salpicadura de gotas de rocío (Wilson & Talbot, 2009).

Síntomas observados en las plantas y etapa de mayor susceptibilidad

Este hongo puede producir lesiones en diferentes órganos de las plantas, pero los síntomas más comunes están relacionados con lesiones foliares, que corresponden a manchas ovaladas de centros blancos o grises y márgenes verde oscuro o marrón rojizo (figura 6.9). Además, puede ocasionar necrosis del cuello: el hongo se ubica entre la unión del limbo y la vaina de la hoja, cuyo limbo necrosa; como consecuencia, el cuello de la hoja se vuelve marrón y el limbo muere. En este caso, si el cuello se infecta antes de la fase de leche, no se forma grano, pero si lo hace más tarde, los granos resultan de mala calidad. El tamaño y la forma de las manchas pueden diferir según la variedad de arroz y ocasionar la pérdida de entre el 70 % y el 80 % del grano (Muñoz, 2008).

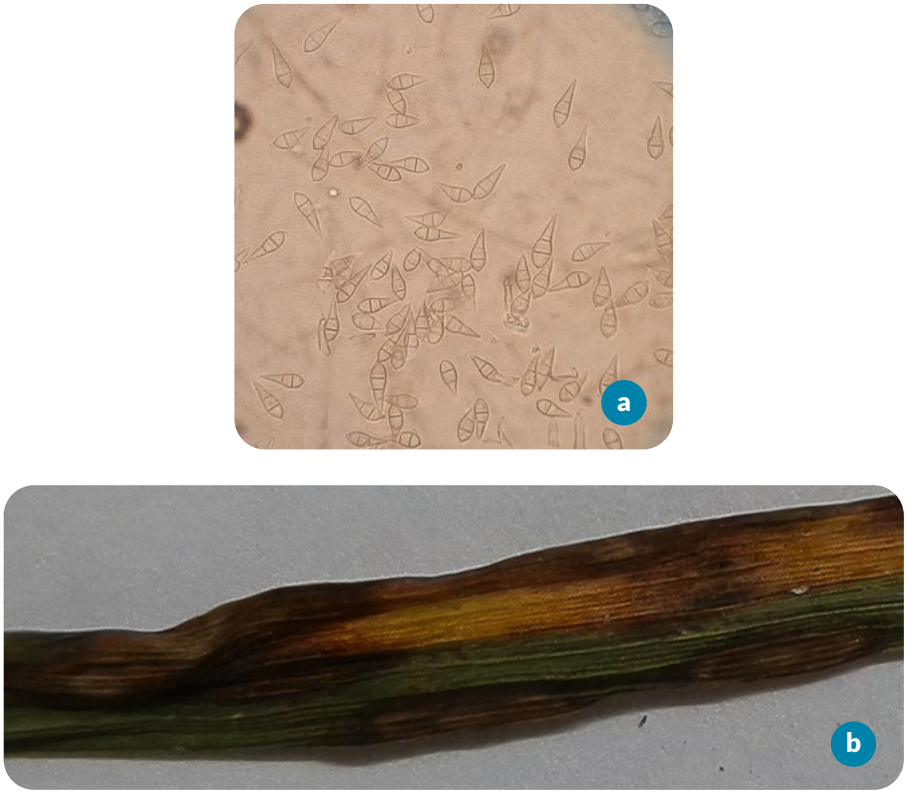


Figura 6.9. Propágulos del hongo (a) obtenidos a partir de síntomas con lesiones esporuladas en la lámina foliar (b).

Fotos: Ángela María Vargas Berdugo.

Condiciones ambientales conducentes de la enfermedad y mecanismos de diseminación

Las condiciones que favorecen la presencia del hongo, su establecimiento y el posterior desarrollo de la enfermedad son la humedad relativa alta (90 % y más), hojas húmedas y temperatura de entre 25 °C y 28 °C. Además, en presencia de lluvias es posible que los propágulos presentes en lesiones avanzadas se transfieran por salpicadura a una planta sana. Adicionalmente, cuando la enfermedad se establece en altas frecuencias en un lote, también es posible que las esporas se dispersen a través del aire o impregnadas en la ropa de los trabajadores (Singh, Bathula et al., 2019).

Finalmente, entre los factores que pueden aumentar el riesgo de que el arroz desarrolle añublo se encuentra una excesiva fertilización nitrogenada con sulfato de amonio (Hosseyni-Moghaddam & Soltani, 2013).

Manejo cultural, genético, químico o biológico

A continuación, se presentan las principales estrategias para mitigar el impacto del añublo o tizón de la vaina de arroz:

- Manejo cultural y biológico:
  - » Establecer variedades resistentes contra este hongo, bien sea las que ha liberado Fedearroz o las que se encuentran en el mercado nacional.
  - » Evitar la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, pues estos le permiten al hongo establecerse de forma más eficiente en la lámina foliar. Para hacerlo, una estrategia consiste en aplicar dosis divididas.
  - » Eliminar arvenses asociadas al cultivo que pueden convertirse en fuente de inoculo.
  - » Evitar siembras tardías, pues el hongo tiene un mecanismo eficiente de diseminación y de sobreposición de ciclos infectivos, lo cual hace posible que se transfiera de un lote a otro.
  - » Aplicar la bacteria *Pseudomonas fluorescens*, por cuanto ha reportado resultados positivos para controlar la proliferación del hongo (Vidhyasekaran et al., 1997).

- Manejo químico: aplicar las dosis recomendadas y los fungicidas registrados ante el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Adicionalmente, por el régimen climático, es adecuado realizar las aplicaciones en la mañana o en la tarde; no al mediodía. Específicamente, las semillas y las plantas se pueden tratar con moléculas como tricyclazole o isoprotiolan, que son productos de síntesis química que actúan de manera sistémica inhibiendo rutas metabólicas esenciales para el crecimiento del hongo. Sin embargo, debido al carácter policíclico de este patógeno, es posible que haya adaptabilidad o tolerancia a la aplicación de diferentes moléculas (Bezerra et al., 2021).

Enfermedades asociadas a síntomas en la panícula

A continuación, se describe una de las enfermedades asociadas a síntomas en la panícula, conocida como el añublo bacteriano, ocasionado por *Burkholderia glumae*. Este patógeno deteriora directamente las panículas y reduce drásticamente la calidad del grano.

Añublo bacteriano (*Burkholderia glumae*)

Esta enfermedad afecta directamente la panícula del arroz y genera pérdida de calidad como consecuencia del aborto floral y la decoloración de granos. Su incidencia es mayor durante la floración, cuando la bacteria invade los tejidos a través de estomas o heridas, provocando marchitez y reducción del rendimiento en condiciones cálidas y húmedas como las que se presentan en el VCAM.

Características generales del patógeno o agente causal

El añublo bacteriano afecta directamente la panícula de la planta de arroz como resultado de la colonización de la bacteria *Burkholderia glumae*, que es un cocobacilo gram (-) del grupo de las proteobacterias. El daño que causa esta bacteria en arroz depende de que pueda ingresar a la planta a través de los estomas y multiplicarse en los espacios intercelulares del parénquima. Dentro de plantas afectadas y como consecuencia de su proceso infectivo, esta bacteria ocasiona el taponamiento de los haces vasculares, lo cual reduce el crecimiento del follaje y genera síntomas de clorosis en las panículas durante la fase de pudrición del grano, de tal manera que es la responsable de causar la marchitez bacteriana (Suzuki et al., 2004).

Síntomas observados en las plantas y etapa de mayor susceptibilidad

En plantas afectadas es posible observar panículas de color café o decoloradas (figura 6.10). Aunque al principio las ramas y las panículas se mantienen verdes, sin lesiones ni presencia de decoloración, se puede presentar aborto floral (Yang, 2004) y en los granos se observan alteraciones en el color,

lo cual afecta su calidad (Zhou et al., 2011). Otros de los síntomas observados en campo son: panículas erguidas, decoloración de los granos, tallos verdes (Betancur, 2011) y, en casos externos, panículas con pocas o todas las flores enfermas (González & Santamaría, 2014). La sintomatología se presenta durante la floración, cuando la bacteria se multiplica activamente invadiendo las espigas de la planta a través de las estomas o de pequeñas heridas en la epidermis de las glumas (Sayler et al., 2006).



Figura 6.10. Síntomas asociados a la infección con *Burkholderia glumae* en plantas de arroz. **a.** Sintomatología en panojas en campo; **b.** Acercamiento de sintomatología en espiguillas.

Foto: Angela María Vargas Berdugo.

Condiciones ambientales conducentes de la enfermedad y mecanismos de diseminación

Se ha reportado que las temperaturas elevadas favorecen la enfermedad, especialmente durante la noche, en conjunto con alta humedad relativa y con precipitaciones frecuentes. La bacteria se puede multiplicar sobre la superficie de las panículas emergentes y sobre las flores justamente después de que se abran. *Burkholderia glumae* invade las semillas germinadas e inhabilita las raíces y las vainas inferiores para crecer sobre la planta como un organismo epífito (Zhou et al., 2011).

Manejo cultural, genético, químico o biológico

Para reducir la incidencia de esta enfermedad se pueden utilizar semillas libres del patógeno y materiales tolerantes. No se recomienda la aplicación de productos o moléculas de síntesis química debido a que puede generar resistencia y un riesgo potencial en moléculas que se emplean para controlar enfermedades bacterianas en humanos y animales.





7

Cosecha, poscosecha y agroindustria

Kelly Johana **Pedroza-Berrío**
José Isidro **Beltrán**

Introducción

En este capítulo se presentan las operaciones de cosecha y poscosecha del arroz, los principales productos alimenticios y el potencial de uso para los residuos generados durante la molienda. Incluye una descripción de las actividades relacionadas con la cosecha manual y mecanizada, los procedimientos y procesos para la poscosecha del arroz, desde la recepción de la materia prima hasta el almacenamiento, y el uso de la cascarilla como principal residuo de la molienda. Asimismo, se destaca la composición nutricional y los principales productos alimenticios derivados del arroz.

Generalidades

Una de las principales fuentes de alimentación es el arroz: con un consumo mundial de 523 millones de toneladas (Orús, 2024), se considera uno de los principales productos que aportan a la seguridad alimentaria. Este cereal forma parte de la dieta de millones de personas en el mundo por su aporte de vitaminas, minerales y energía. No obstante, estas características pueden cambiar y ser afectadas por la variedad, las condiciones edafoclimáticas y el manejo del cultivo, incluyendo las operaciones de cosecha y poscosecha, fundamentales para garantizar la vida útil y reducir los riesgos de contaminación durante el almacenamiento del arroz. Específicamente, la agroindustria molinera del arroz en Colombia se concentra sobre todo en Tolima, Huila, Meta y Casanare, donde se realizan operaciones de almacenamiento en silo, descascarillado, pulido, selección, clasificación y empaque del arroz.

Características del grano de arroz

El grano de arroz es una estructura compleja que se compone de varias capas: la cascarilla (formada por la palea y la lema), el pericarpio (compuesto por el exocarpio, el mesocarpio y el endocarpio), el endospermo o arroz blanco y el germen o embrión (figura 7.1). El pericarpio, la testa y la aleurona cubren el endospermo y el embrión. El endospermo representa el 80 % del peso del

grano de arroz, mientras que el 20 % restante está relacionado con la cáscara y las capas que lo componen, siendo el principal residuo en los procesos de molienda. Esta compleja composición influye de manera significativa en la distribución de los nutrientes en el grano, entre los cuales se destaca el almidón, seguido por proteínas, tiamina, niacina, riboflavina y minerales tales como hierro y calcio (Müller, 2022).

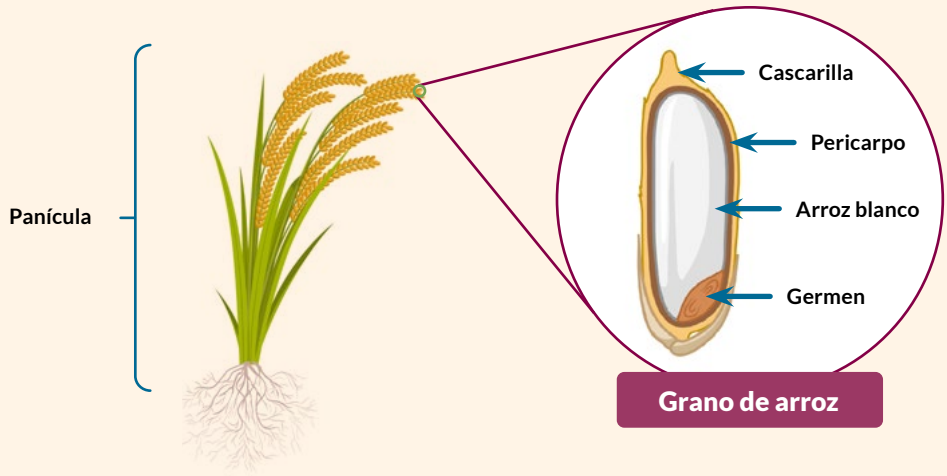


Figura 7.1. Composición del grano de arroz.
Fuente: Elaboración propia realizada con Biorender.

Cosecha

La cosecha es el proceso de recolección del arroz maduro de forma mecanizada o manual. En esta etapa no solo es importante aplicar métodos adecuados para maximizar el rendimiento del grano y reducir el deterioro de la calidad, sino también elegir el momento apropiado para cosechar, pues una recolección anticipada del grano dará como resultado granos inmaduros o vanos, lo cual disminuye el rendimiento y aumenta los granos partidos durante la molienda (Preciado et al., 2018).

Cabe señalar que no se recomienda realizar las actividades tradicionales de cosecha, como el secado en campo y el apilamiento, pues provocan un rápido deterioro de la calidad y aumentan las pérdidas del grano. Entre las variables importantes que definen el criterio de la cosecha se encuentran la madurez y la humedad, cuyo rango ideal para hacer la recolección oscila entre 19 % y 22 %, pues humedades inferiores reducen el rendimiento y pueden generar grietas en los granos por adsorción de humedad y aumento de los granos partidos durante la molienda (Siebenmorgen et al., 2007). Además, mientras que la recolección de granos con humedades de entre el 18 % y el 23 % facilita los procesos de molienda, principalmente las operaciones de recepción y secado (Lang et al., 2020), las altas humedades de los granos verdes (alrededor del 28 %) generan pérdidas de hasta 8 % en la recolección por la adherencia del grano a la panícula (Preciado et al., 2018).

En cuanto a las técnicas para recolectar el arroz, se han adoptado principalmente la manual y la mecanizada (figura 7.2). La cosecha manual, que integra el corte con hoz de las panículas y la trilla, es aplicada en cultivos de poca extensión o cuando se dificulta el acceso de maquinaria para recolectar el grano. También es posible cosechar de forma semimecanizada, realizando el corte manual y usando una máquina para trillar. Por su parte, la cosecha mecanizada se hace con cosechadoras —también llamadas convencionalmente *combinada*—, las cuales están compuestas por varios sistemas que permiten cortar, recolectar, trillar, limpiar, separar y almacenar los granos de arroz maduros, razón por la cual es la técnica más utilizada en cultivos de grandes extensiones.

Sin embargo, se debe señalar que pueden existir pérdidas de grano cuando se usan las combinadas dependiendo del ajuste y el estado de la máquina durante la cosecha. Asimismo, las condiciones edafoclimáticas, el manejo agronómico, las plagas y las enfermedades pueden disminuir el rendimiento antes de cosechar el grano.



Figura 7.2. Cosecha manual (a) y mecanizada (b) de arroz.
Fotos: Juan Felipe Vélez-González y John Edison Calderón-Carvajal.

Como se ha evidenciado hasta este punto, el manejo de la cosecha es determinante en el rendimiento del grano y, por lo tanto, en el aumento de la actividad productiva. Algunos factores, como el número de panículas por unidad de área (panículas m^{-2}) y de espiguillas por panícula, así como el porcentaje de granos llenos y el peso (peso de 1.000 granos g^{-1}), pueden considerarse como variables cuantitativas que dependen del manejo agronómico, incluyendo la fertilización, el uso del recurso hídrico, la densidad de siembra, las plagas, las enfermedades y la luminosidad (Sudeepthi et al., 2020), pues durante el desarrollo de la planta se presentan cambios en la fase vegetativa, reproductiva

y de maduración que influyen en su rendimiento. Para identificar estos cambios y mejorar la producción, a continuación se describen las variables de importancia que se pueden medir en cada fase:

- Fase vegetativa: número de panículas.
- Fase reproductiva: número de espiguillas.
- Fase de maduración: porcentaje de granos llenos y peso del grano.

Finalmente, es importante tener en cuenta que el número de panículas está determinado por el genotipo y depende tanto de las condiciones edafoclimáticas, como de la interacción genotipo-ambiente. Además, la fertilización tiene un efecto significativo durante el crecimiento de la planta y en la calidad nutricional del grano al momento de la cosecha (Anisuzzaman et al., 2021).

El proceso de cosecha o recolección en el VCAM se realiza a granel de forma 100 % mecanizada con cosechadoras autopropulsadas para la corta, trilla, separación del grano y la paja y limpieza del grano dentro del mismo sistema. Posteriormente se realiza el proceso de descarga al remolque granelero, que a su vez hará el cargue en un camión o volqueta que efectúa la entrega final en el molino, donde se comercializa el grano.

Poscosecha

En los procesos de producción se debe garantizar la calidad desde que se recibe la materia prima hasta la obtención del producto final. En el caso del arroz, la molienda permite obtener diferentes productos, entre ellos el arroz blanco e integral, y subproductos como harina y cascarilla. Antes de iniciar este proceso, en la compra del arroz *paddy* que será molido son determinantes la humedad y las impurezas: según Preciado et al. (2018), las tablas para la recepción de este tipo de arroz permiten humedades de entre el 24 % y el 25 %, así como impurezas de entre el 3 % y el 5 %. Por lo anterior, es importante conocer las características de calidad que tiene el arroz cosechado antes de la venta.

Molinería del arroz

Los molinos de arroz realizan procesos que incluyen compra, transformación, empaque y comercialización del arroz y los subproductos obtenidos durante el proceso de acondicionamiento del grano. A continuación, se describen las actividades que se llevan a cabo durante la molienda:

- Recepción y pesaje.
- Limpieza y preparación.
- Descascarillado.
- Pulido o blanqueado.
- Clasificación y control de calidad.
- Empaque y almacenamiento.
- Distribución del producto terminado.

La recepción del arroz *paddy* en plataforma exige que se tome una muestra para medir los parámetros de humedad, impureza y granos partidos, los cuales tienen un valor de referencia de 24 %, 3 % y 20 %, respectivamente. Como se muestra en la figura 7.3, la calidad del arroz que ingresa al proceso de molienda puede ser analizada de acuerdo con protocolos estandarizados y equipos especializados que garanticen la objetividad en los resultados, para lo cual es necesario contar con una muestra representativa del lote que se quiere evaluar.

Una vez seleccionada la muestra para el análisis, una porción de esta es llevada al cuarteador para homogeneizar la que será utilizada en los análisis posteriores. Por una parte, el porcentaje de humedad del grano se evalúa con una máquina que permite hacer una prueba rápida de entre 2 y 5 minutos, dependiendo de la tecnología que tenga el equipo de medición. Por otra parte, para determinar las impurezas —incluyendo piedras, hojas, vainas, granos vanos, semillas u otro material diferente a los granos de arroz— se usa una máquina limpiadora compuesta por un set de cribas que solo permiten el paso de los granos y retienen las impurezas.

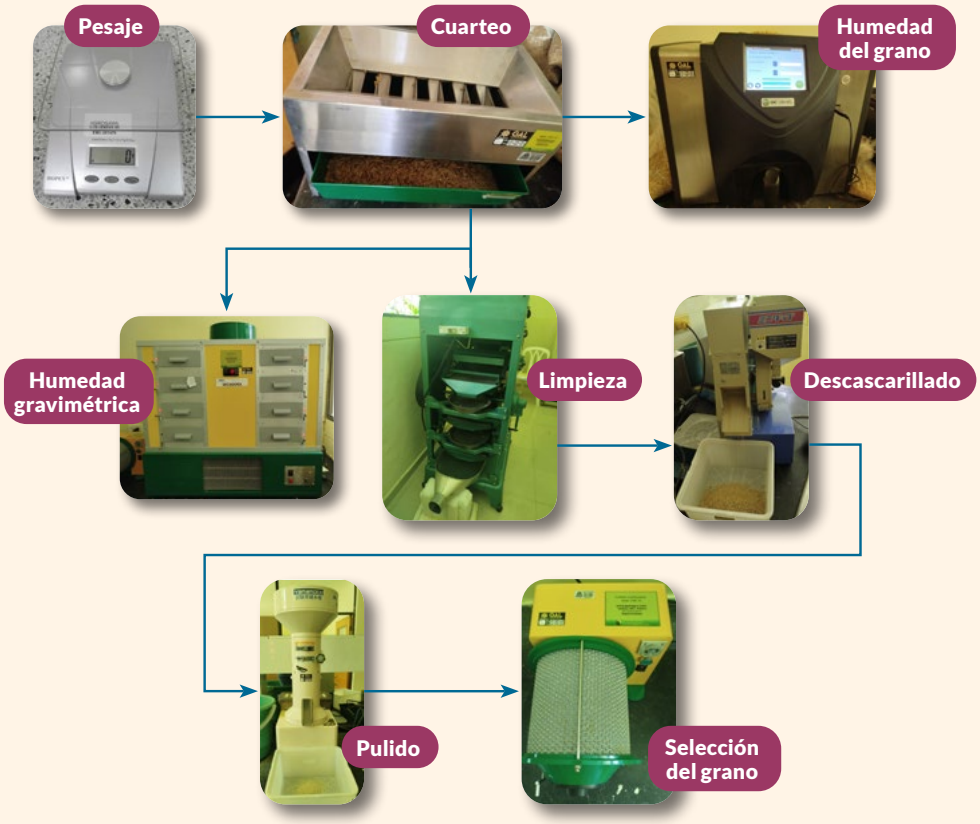


Figura 7.3. Proceso para determinar y garantizar la calidad del arroz tipo *paddy* que ingresa a molienda.

Fuente: Elaboración propia.
Fotos: Kelly Johana Pedroza Berrío.

Luego de estos análisis y para garantizar la calidad molinera, los granos de arroz se secan hasta que tienen una humedad del 14 %, para lo cual se usa una corriente de aire caliente producido por una turbina alimentada con cascarilla de arroz. Una vez finaliza el secado, el grano se almacena en silos para continuar con la trilla o molinería, en la cual se hace la separación de la cascarilla, el pulido o blanqueamiento, la clasificación, la selección y el empaque, procesos que permiten clasificar el arroz en diferentes estados durante la molienda (figura 7.4).



Figura 7.4. Clasificación de los granos arroz durante el proceso de molinería.
a. *Paddy*; **b.** Integral; **c.** Blanqueado; **d.** Partido.
Fotos: Kelly Johana Pedroza-Berrío.

Específicamente, para remover la cascarilla se usa una descascaradora, que tiene un par de rodillos de caucho que giran hacia la dirección interna a varias velocidades, de tal forma que los granos se someten a una fuerza abrasiva que separa la cascarilla y el arroz integral. Posteriormente, usando corrientes de aire se separa el grano de la cascarilla y se depuran los granos "macho" —los que aún conservan la cascarilla— y los granos partidos.

En el blanqueado y pulido se pasan los granos de arroz a través de rodillos de molienda para que la fricción entre ellos remueva el salvado y se obtenga tanto el arroz blanco como la harina de arroz que queda como subproducto del proceso. El arroz blanqueado es clasificado electrónicamente por color, granos

dañados, yesados e impurezas, lo cual garantiza la uniformidad en los granos. Esta selección también se puede hacer según el tamaño usando clasificadoras de alta velocidad y mallas que permiten diferenciar los granos. Una vez se ha clasificado con un tamaño uniforme, el arroz es pesado y almacenado en diferentes presentaciones y empaques, entre los cuales se encuentran de materiales plásticos y bolsas de nylon tejido.

Agroindustria del arroz: transformación y tendencias en el uso de residuos

La composición química y nutricional del arroz, así como sus propiedades tecnofuncionales son los criterios más relevantes para definir su uso y procesamiento agroindustrial en productos alimenticios. Específicamente, la composición química del arroz blanco pulido incluye proteínas (6,8 g-100 g), hierro (1,22 g-100 g), zinc (0,5 g-100 g) y fibra (0,6 g-100 g) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2004). Adicionalmente, el arroz tiene compuestos bioactivos, principalmente fenoles como ácidos fenólicos, flavonoides y taninos, los cuales son importantes porque tienen propiedades funcionales que pueden ejercer efectos antioxidantes y ayudar a prevenir el daño celular cuando son consumidos en la dieta (Ryan, 2011).

Por otro lado, los carbohidratos presentes en el arroz alcanzan el 80 % del aporte nutricional, entre los cuales predomina el almidón, que a su vez se compone de fibra y azúcares libres, como fructosa, rafinosa y glucosa (Arsha et al., 2021). La composición de almidones depende de los genotipos y permite clasificar el arroz por su relación de amilopectina. Específicamente, el 99 % de los almidones cerosos o tipo *waxy* están compuestos por amilopectina y diferentes niveles de contenido de amilosa: bajo (entre 2 % y 20 %), medio (entre 12 % y 25 %) y alto (entre 25 % y 53 %). Este parámetro, incluyendo la estructura de la cadena de amilopectina y el contenido de proteína, se tiene en cuenta para determinar el uso del arroz en productos alimenticios en los que pueda mejorar sus características reológicas y texturales (Ghosh et al., 2019), razón por la cual los principales productos alimenticios de consumo masivo están

basados en harina y almidón de arroz. En la tabla 7.1 se muestran las propiedades tecnofuncionales de la harina y el almidón de arroz que se integran como ingredientes para mejorar la calidad de productos alimenticios.

Tabla 7.1. Productos alimenticios a base de harina y almidón de arroz

Producto	Productos derivados	Características físicas y tecnofuncionales
Harina de arroz	Pasta	• Bajo contenido de alérgenos. • Mayor contenido de proteína y lípidos comparado con el almidón. • Favorece la textura y la viscosidad. • Mejoran los procesos de sinéresis de los productos. • Formación de una estructura viscoelástica que permite atrapar el gas durante la fermentación.
	Horneados	
	Alimentos fermentados	
	Salsas	
Almidón de arroz	Ingrediente para postres	• Bajo contenido de proteína y lípidos en la fracción de almidón. • Sabor suave y textura cremosa. • Formación de geles suaves con tamaños de partícula entre 3 y 8 micras. • Su estructura le permite ser utilizado como sustituto de la grasa, al calentamiento proporciona geles de sabor neutro y color blanco transparente.
	Horneados	
	Cereales para el desayuno	
	Alimentos infantiles	
	Alimentos clasificados como hipoalergénicos	

Fuente: Elaboración propia con base en Tagliapietra et al. (2024), Rathnayake et al. (2022) y Bao (2019).

Residuos de la poscosecha del arroz y su potencial en la industria

La producción excesiva de los residuos generados en las cadenas de producción alimentaria ha llevado a implementar procesos que permitan el uso de este material como parte de la estrategia de economía circular. Gracias a su composición fisicoquímica, los residuos pueden ser aprovechados, a veces sin realizar procesos de acondicionamiento. En la industria molinera del arroz, el principal residuo es la cascarilla, que alcanza 150 millones de toneladas en el mundo (Kordi et al., 2024). Como se muestra en la figura 7.5, con este residuo se pueden obtener productos como biomateriales, compuestos

químicos, combustible para generación de energía, alimentación animal, papel y carbón, productos que son considerados de importancia económica cuando se incluyen en procesos industriales que demandan gran cantidad de energía.

Como menciona AboDalam et al. (2022), debido a la presencia de fibras compuestas por celulosa, hemicelulosa, lignina y minerales como la sílice, los residuos de cascarilla de arroz son valorados en la industria porque permiten obtener diferentes productos, como el carbón vegetal o también llamado biocarbón y las cenizas, que han demostrado su aplicación en la industria agrícola, energética y de biomateriales. De esta manera, los residuos de cascarilla de arroz aportan a la sostenibilidad ambiental cuando se integran tecnologías que permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante el procesamiento, con lo cual se reduce el impacto de los residuos y se hace más sostenible la producción de arroz, uno de los productos líderes en el mercado mundial.

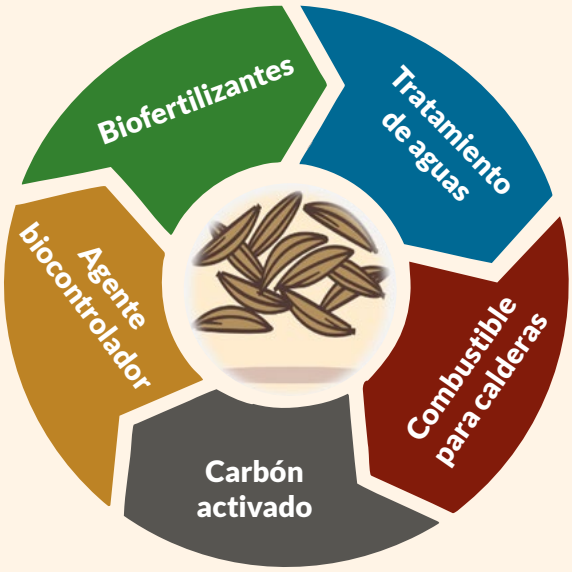


Figura 7.5. Principales aplicaciones de la cascarilla de arroz.

Fuente: Elaboración propia



8

Indicadores económicos de la cadena de valor en el VCAM

Sonia Mercedes **Polo-Murcia**
Sofiane **Ouazaa**

Introducción

Este capítulo analiza los principales indicadores económicos de la cadena de valor del arroz en el VCAM, enfocándose en los cambios en los costos de producción y los beneficios de adoptar tecnologías de riego como *alternate wetting and drying* (AWD, 'riego alternando moje y secado') y *multiple inlet rice irrigation* (MIRI, 'riego por múltiples entradas de agua'). Incluye una revisión del Área Mínima Rentable (AMR) para ilustrar las diferencias en rentabilidad entre regiones. Además de presentar una comparación de precios pagados al agricultor por tonelada de arroz *paddy* verde en Huila y Tolima, se destacan patrones de precio y eficiencia en el uso del agua, lo cual proporciona una base para la toma de decisiones de inversión en tecnologías agrícolas que buscan ser más sostenibles y rentables.

Indicadores económicos

La rentabilidad del cultivo de arroz en Colombia está marcada por una diversidad de factores económicos y territoriales que afectan tanto a pequeños como a grandes productores. Uno de los conceptos clave para entender esta variabilidad es el AMR, que establece el tamaño mínimo de una explotación agrícola para que pueda generar ingresos suficientes que cubran los costos y aseguren al productor, en promedio, dos salarios mínimos mensuales (Becerra et al., 2020). Este indicador no solo proporciona una medida de eficiencia económica, sino que también refleja los desafíos que enfrentan los productores en diversas regiones del país.

De acuerdo con Becerra et al. (2020), el promedio nacional de AMR para el cultivo de arroz es de 8,5 ha, con la zona de los Llanos registrando el AMR más alto (11,5 ha) y los Santanderes el más bajo (5,1 ha). En el caso del Huila y Tolima, ubicados en la zona Centro, o más específicamente en el VCAM, el AMR presenta una situación particular, en la cual el promedio es de 6,3 ha. Sin embargo, más del 50 % de las Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) de esta zona son menores a ese umbral, lo que refleja una marcada disparidad en la rentabilidad de las explotaciones.

Esta disparidad responde a factores históricos de parcelación de tierras, limitada formalización de la propiedad y predominio de agricultura familiar. Las UPA menores a la AMR enfrentan restricciones de acceso a riego tecnificado, crédito, tecnologías adaptadas y mercados, lo cual eleva sus costos medios y reduce la eficiencia productiva. Para mejorar su viabilidad económica, se requieren estrategias de asociatividad, programas diferenciados de asistencia técnica y financiamiento, así como incentivos para la adopción tecnológica a pequeña escala y el acceso a esquemas de comercialización más favorables.

Este capítulo detalla los costos de producción de arroz por hectárea desde 2017 hasta 2023 en el VCAM y los beneficios económicos, con especial énfasis en la implementación de tecnologías de riego. Los costos nominales de producción por hectárea fueron obtenidos de la base de datos de estadísticas arroceras de la división de Investigaciones Económicas de la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz, 2024). Cabe señalar que los costos nominales fueron ajustados a valores reales utilizando el índice de precios al consumidor (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2024), recalculando todos los valores a pesos constantes de 2023. Este ajuste elimina las distorsiones inflacionarias y refleja variaciones auténticas en los costos de producción, esenciales en un sector donde los insumos y las prácticas de gestión varían anualmente debido a avances tecnológicos, políticas agrícolas y condiciones climáticas.

Durante el período 2017 a 2023, el costo total de producción por hectárea aumentó progresivamente desde $ 9.831.909 (pesos colombianos) en 2017 hasta $ 11.804.733 en 2022, seguido de una disminución a $ 9.511.926 en 2023. Específicamente, los costos de fertilización se incrementaron de $ 1.891.859 en 2017 a $ 4.123.572 en 2022, antes de reducirse a $ 2.197.110 en 2023. Los costos relacionados con el riego mostraron una tendencia decreciente, de $ 1.017.315 en 2017 a $ 763.986 en 2023.

Los datos por semestre muestran variaciones en la distribución de los costos de producción En el primer semestre, los costos de fertilización por hectárea cultivada escalan de 18,8 % en 2017 a 39,9 % en 2022, descendiendo a 29,9 % en 2023. Los costos de arriendo (costo de oportunidad de la tierra) variaron de 21,6 % en 2017 a 18,3 % en 2023, con una reducción en 2022 a 15,4 % (figura 8.1). En el segundo semestre, los costos de fertilización ascendieron a 34,9 % en 2022 desde 19,2 % en 2017, disminuyendo posteriormente a 23,1 % en 2023. Los costos de arriendo incrementaron de 15,3 % en 2022 a 20,5 % en 2023. Además, los costos de recolección y transporte mostraron una tendencia decreciente en ambos semestres, lo que puede indicar mejoras en la eficiencia logística (figura 8.1.b).

Al comparar los precios del arroz *paddy* verde en Huila y Tolima durante el período de 1996 a 2023 (figura 8.2), se observan tendencias interesantes que reflejan cómo cada región ha respondido a los cambios en el mercado y a las condiciones externas a lo largo del tiempo. Los precios, ajustados a pesos constantes de 2023, muestran patrones de crecimiento y también períodos de estabilidad o decrecimiento que pueden estar vinculados a factores económicos, climáticos y tecnológicos.



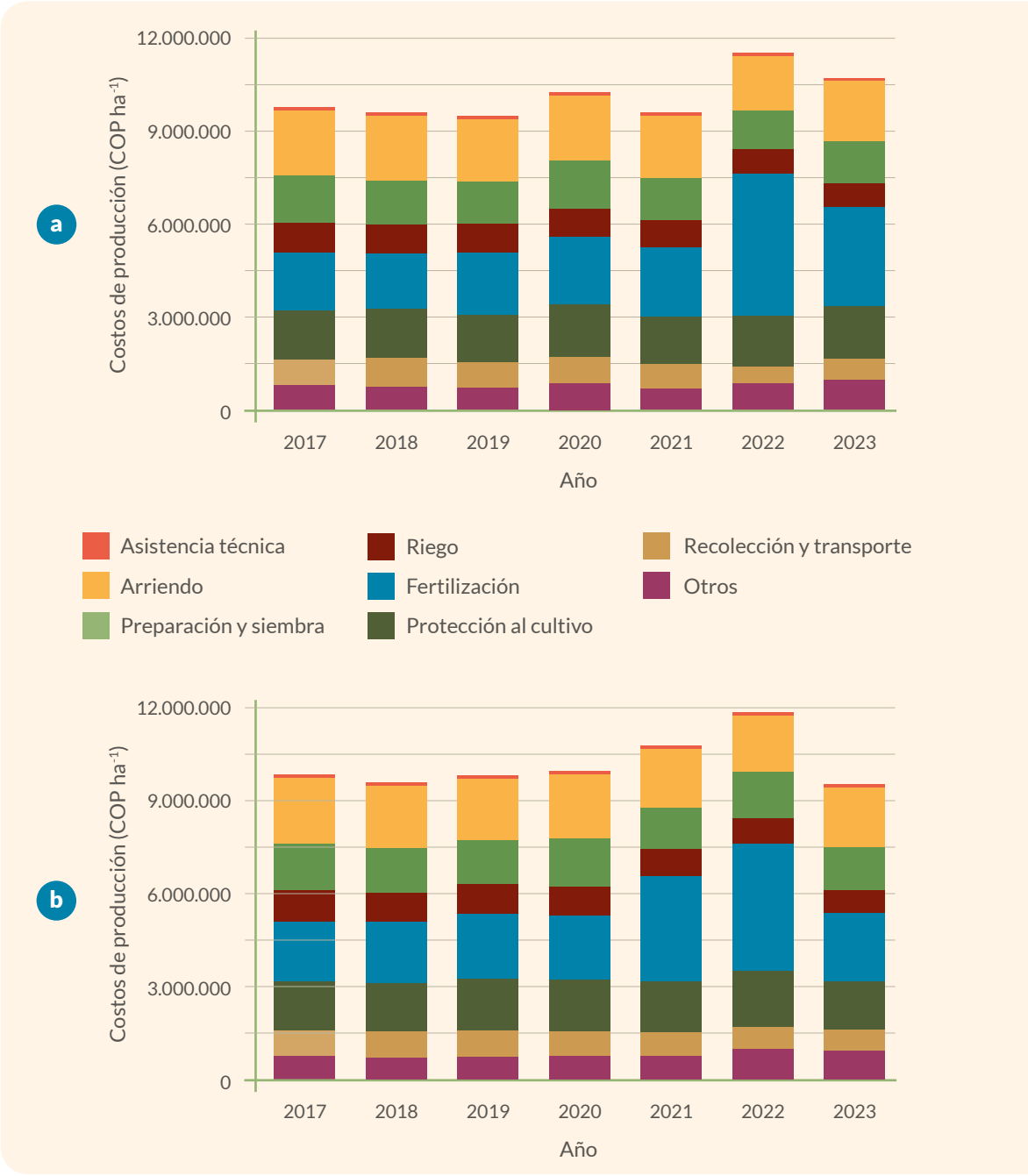


Figura 8.1. Evolución del costo de producción por hectárea de arroz riego en el VCAM (Huila-Tolima), valores a pesos constantes de 2023. **a.** Semestre I; **b.** Semestre II.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Fedearroz (2024).

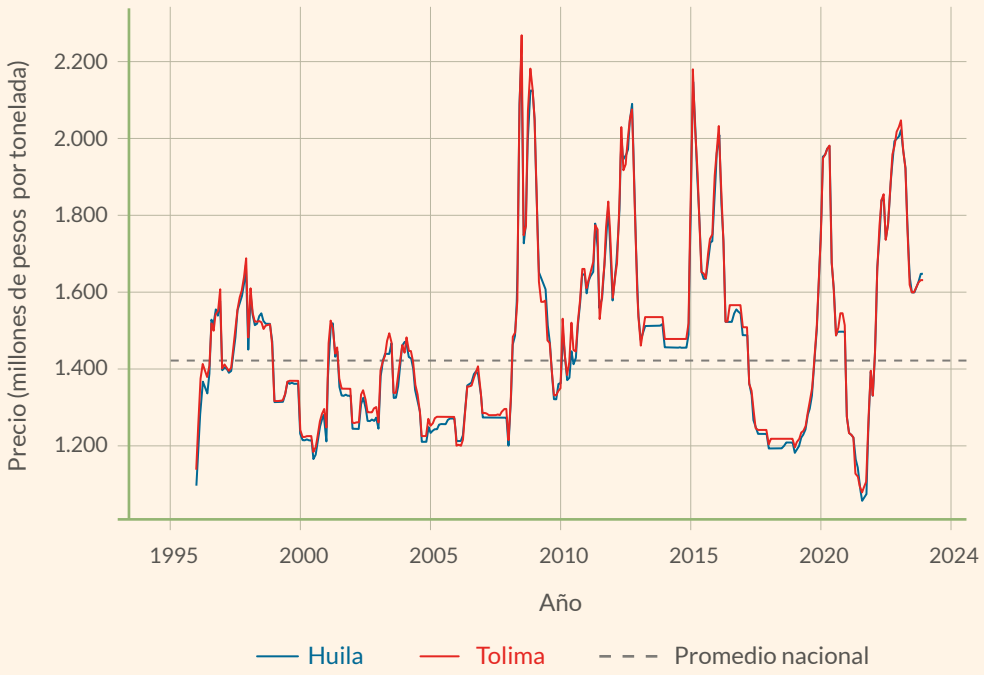


Figura 8.2. Precios de arroz *paddy* verde en Huila y Tolima durante el período 1996-2023. Valores reales de 2023.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Fedearroz (2024).

Huila muestra una tendencia general de crecimiento en los precios del arroz, aunque con fluctuaciones que sugieren vulnerabilidad a factores externos como el clima y los cambios en la política agrícola. Un ejemplo claro de este crecimiento se observa en la primera década analizada, donde los precios por tonelada de arroz *paddy* verde incrementaron desde aproximadamente $ 1,09 millones en 1996 hasta alrededor de $ 1,23 millones en el 2000. Sin embargo, este crecimiento fue seguido por períodos de estabilidad y leves fluctuaciones hasta 2008, donde se observa un nuevo aumento significativo, pues alcanzó precios cercanos a los $ 2,2 millones en 2008, posiblemente influido por factores globales como la crisis financiera mundial que impactó los precios de los *commodities* agrícolas.

Tolima, por otro lado, también exhibe incrementos en los precios a lo largo del tiempo, con períodos de crecimiento más marcados y abruptos comparado con Huila. En particular, el período entre 2006 y 2008 muestra un aumento drástico, donde los precios pasaron de aproximadamente $ 1,35 millones a más de $ 2,06 millones por tonelada, lo cual refleja posiblemente un auge en la demanda o una reducción en la oferta debido a condiciones climáticas adversas. Posteriormente, los precios en Tolima muestran una tendencia al alza más consistente que en Huila, pues alcanza los $ 2,03 millones hacia el final del período en 2023.

En 2023, el área destinada al cultivo de arroz en Colombia fue de 692.590 ha, lo que equivale al 35 % de los cultivos de ciclo corto y el 13 % del total de áreas sembradas en el país (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2023). A pesar de la disminución en los precios del arroz durante 2023, tras alcanzar niveles máximos en 2022, el área sembrada experimentó un incremento del 3,1 %. Este crecimiento se atribuye a una recuperación parcial frente a la reducción de siembras causada por condiciones climáticas adversas en 2022, así como a la disminución del 24 % en las importaciones durante 2023, lo que incentivó la producción nacional (UPRA, 2023).

Valor de la producción

La agroindustria del arroz incluye tanto la fase agrícola como el primer nivel de transformación industrial. En 2022, el valor total de esta agroindustria fue de $ 10,7 billones, de los cuales la fase industrial contribuyó con el 53,6 % y la fase agrícola con el 46,4 %. La producción de arroz se concentró en tres regiones: Llanos, con una participación del 49,5 %, seguida por Centro (31,4 %) y Bajo Cauca (9,2 %) (DANE, 2023). Entre 2018 y 2022, la fase agrícola de la agroindustria del arroz representó en promedio el 0,14 % del valor agregado nacional. En cuanto al valor agregado de la actividad de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, la participación promedio fue del 1,75 %. Respecto al valor agregado de los cultivos agrícolas transitorios y permanentes, así como actividades de apoyo y conexas, la participación promedio fue del 2,48 % (DANE, 2023).

Durante el mismo período, la fase industrial del arroz tuvo una participación promedio del 0,75 % en el valor agregado de las industrias manufactureras. En relación con el valor agregado de la industria de alimentos y bebidas, su participación promedio fue del 2,59 %. Además, en el valor agregado de la industria de molinería, la participación promedio fue del 15,66 % (DANE, 2023).

La figura 8.3 muestra el valor de la producción de arroz *paddy* verde en el sistema de riego del VCAM y detalla los ingresos mensuales desde enero hasta diciembre de 2023, expresados en millones de pesos constantes a precios del año 2022. Se observa que los meses de agosto y septiembre tienden a reportar los mayores valores de producción, destacando especialmente agosto de 2023, donde se alcanzó un máximo de $ 218.956 millones. Por otro lado, los meses de mayo y junio generalmente muestran los menores valores, alineados con los períodos intermedios entre las temporadas de siembra y cosecha. A lo largo del año, el valor de la producción varió, con un incremento notable en 2023 que culminó en un total anual de $ 1.549.424 millones. Este comportamiento refleja las respuestas de los productores a las variaciones estacionales y las fluctuaciones del mercado.

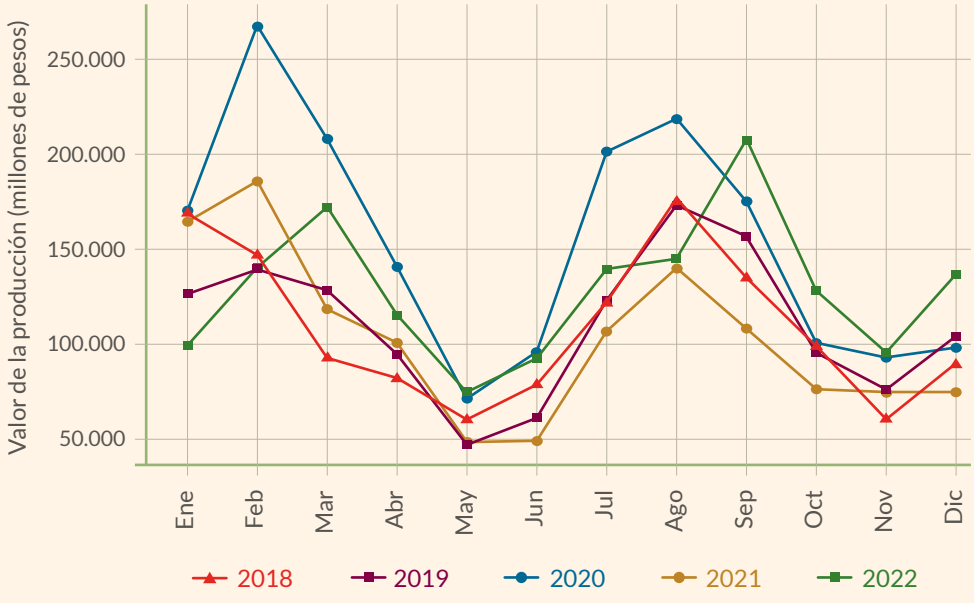


Figura 8.3. Valor de la producción de arroz *paddy* verde mensual en el VCAM.

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE y Fedearroz (2023).

Beneficios económicos de las tecnologías de riego

La adopción de métodos de riego, como MIRI y AWD, puede ofrecer significativos beneficios económicos para los agricultores en el cultivo de arroz. La decisión de adoptar una técnica de riego está influida por el análisis económico que los agricultores realizan, en el cual evalúan tanto los costos directos e indirectos como los posibles retornos netos (Liu et al., 2018).

El método de riego AWD, en particular, se ha destacado por su capacidad para reducir los costos de operación relacionados con el consumo de combustible, la reparación y mantenimiento de equipos, así como la mano de obra, en comparación con los métodos de riego convencionales (Asci et al., 2015). Estos ahorros surgen principalmente porque en esta técnica se requiere menor cantidad de agua, lo cual reduce el costo asociado con el bombeo de agua, un componente significativo del costo total de riego. Según Atwill et al. (2021), el método AWD requiere entre 23 % y 39 % menos de agua en comparación con los sistemas convencionales. Esto disminuye no solo los costos de combustible, sino también la necesidad de reparaciones y mantenimientos frecuentes en la maquinaria utilizada para extraer y distribuir el agua.

El análisis de costos es un componente fundamental en la toma de decisiones sobre la adopción de estos métodos. Los costos de instalación de riego incluyen mano de obra, combustible, reparación y mantenimiento de equipos, así como otros costos fijos asociados, como la adecuación del lote, la instalación y la remoción de compuertas, y la puesta en funcionamiento de pozos y bombas. Además, la metodología empleada para calcular estos costos considera la depreciación de la maquinaria, los costos de combustible y electricidad, y los costos laborales, lo cual permite a los agricultores realizar un análisis económico detallado antes de adoptar un nuevo sistema de riego.

En este contexto, los sistemas MIRI y AWD requieren una inversión inicial en materiales específicos. Para el sistema MIRI, los materiales de inversión incluyen tubería de polietileno, la cual es fundamental para la distribución del agua en los arrozales, y medidores de flujo, que son esenciales para monitorear la cantidad de agua suministrada. Además, se necesita equipo para instalar y remover la tubería, así como la mano de obra para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema.

Por otro lado, el sistema AWD, aunque también implica costos iniciales relacionados con la instalación de tubería de polietileno y el sistema de control de riego, presenta ventajas en términos de costos operativos a largo plazo. Esto incluye menores requerimientos de mano de obra y reducciones en el consumo de diésel, lo cual compensa los costos iniciales. Asimismo, el sistema AWD requiere equipo de medición de humedad del suelo para gestionar adecuadamente los ciclos de secado y rehumedecimiento, lo que es clave para su eficiencia.

En términos comparativos, aunque ambos sistemas presentan mayores costos fijos iniciales debido a la instalación de tuberías, el sistema AWD destaca porque a largo plazo tiene costos operativos más bajos. Además, los menores requerimientos de mano de obra y las reducciones en el consumo de diésel compensan estos costos iniciales, lo cual redunda en mayores retornos netos para los agricultores (Vories et al., 2005).

En el marco del proyecto "Manejo por sitio específico del agua de riego, el nitrógeno y las malezas en el sistema de producción arroz, maíz-algodón en el Departamento del Tolima", código interno 1001643, Fase III (*RiceClimaRemote*), realizado en conjunto con AGROSAVIA, el Flanders Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food (ILVO) y la Universidad de Ibagué (Unibagué) en Espinal, Tolima, se evaluaron tres técnicas de riego diferentes: MIRI, AWD y convencional (CD) en dos ciclos de cultivo de arroz. Los resultados de estos experimentos mostraron variaciones considerables en los beneficios netos obtenidos por hectárea, así como en la eficiencia económica por milímetro de

agua aplicada. En el primer ciclo, la técnica CD presentó los mayores beneficios netos, con $ 14.405.800/ha, impulsados principalmente por un mayor rendimiento comparado con las otras dos técnicas. Sin embargo, en el segundo ciclo, la técnica AWD se destacó al lograr el mayor beneficio neto, con $ 12.612.200/ha, lo cual evidencia su eficiencia en diferentes condiciones de cultivo (tabla 8.1).

Tabla 8.1. Análisis de presupuesto parcial para la producción de arroz con diferentes técnicas de riego ($/ha y $/mm)

Ciclo/Tratamiento	MIRI	AWD	CD
Ciclo 1			
Rendimiento ajustado (t/ha)	7,62	7,61	8,01
Beneficios brutos totales ($/ha)	13.972.600	13.942.200	14.687.000
Costos variables totales ($/ha)	406.600	258.400	281.200
Beneficios netos ($/ha)	**13.562.200**	**13,687,600**	**14.405.800**
Agua aplicada (mm)	457,3	517,9	994,8
Beneficios netos ($/mm)	**29.655**	**26.410**	**14.477**
Ciclo 2			
Rendimiento ajustado (t/ha)	6,88	7,35	6,75
Beneficios brutos totales (COP/ha)	12.125.800	12.961.800	11.897.800
Costos variables totales (COP/ha)	357.200	349.600	125.400
Beneficios netos (COP/ha)	**11.768.600**	**12.612.200**	**11.772.400**
Agua aplicada (mm)	264	231,9	404,7
Beneficios netos (COP/mm)	**44.576**	**54.378**	**29.089**

AWD (*alternate wetting and drying*): riego alternando moje y secado.
MIRI (*multiple inlet rice irrigation*): riego por múltiples entradas.
CD: riego convencional.

Fuente: Elaboración propia con base en el informe final del proyecto con código interno 1001643, Fase III (*RiceClimaRemote*).

Adicionalmente, al analizar los costos variables asociados al uso del agua por milímetro aplicado, se observó que la técnica AWD mostró una alta rentabilidad por unidad de agua, pues alcanzó beneficios netos de $ 26.410/mm en el primer ciclo y $ 54.378/mm en el segundo. Estos valores superan ampliamente los que obtuvieron las técnicas CD y MIRI, lo cual sugiere que, aunque las técnicas de riego convencional puedan generar mayores rendimientos en ciertas condiciones, la técnica AWD puede ser más ventajosa desde una perspectiva económica a largo plazo, especialmente en escenarios donde la disponibilidad de agua es un factor limitante.

Estos hallazgos subrayan la importancia de incentivar a los agricultores para adoptar prácticas de riego más eficientes como AWD, dado que muestran una clara ventaja económica en términos de retorno por unidad de agua aplicada, lo cual podría traducirse en una gestión más sostenible y rentable de los recursos hídricos en la agricultura de arroz en el VCAM.





9

Servicios ecosistémicos asociados al arroz

Sonia Mercedes **Polo-Murcia**
Sofiane **Ouazaa**

Introducción

El capítulo ofrece una visión general de los servicios ecosistémicos asociados al cultivo de arroz con base, principalmente, en estudios internacionales que destacan beneficios como la regulación del agua, el soporte a la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y los aportes culturales. Aunque se reconoce la alta demanda de agua del arroz en sistemas como el del VCAM, esta revisión subraya el potencial de prácticas de manejo sostenible que optimicen los beneficios ambientales. Con ello, el capítulo invita a hacer una gestión más equilibrada que favorezca tanto la productividad como la sostenibilidad ecológica.

Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que obtenemos de la naturaleza, como alimentos, agua limpia y aire puro (Fu et al., 2013; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005), pero pueden variar según las experiencias de las personas involucradas (Cebrián-Piqueras et al., 2017). En el contexto del VCAM, en Huila y Tolima, el cultivo de arroz es fundamental no solo para la economía y la alimentación local, sino también para el equilibrio del medioambiente.

Estudios en otros países, como Japón y Corea, han demostrado el valor económico y ambiental del arroz. En Japón, por ejemplo, el valor de los beneficios de los arrozales alcanza los USD 73.000 millones, y su capacidad de retención de agua es importante para prevenir inundaciones (Natuhara, 2013). Aunque se han identificado muchos beneficios del cultivo de arroz, todavía no existe un consenso sobre su evaluación cuantitativa (Chen et al., 2015; Fang et al., 2021). A continuación, se presentan las contribuciones del cultivo de arroz a varios servicios ecosistémicos.

Regulación del agua

La capacidad de los campos de arroz para regular el agua está influida por diversos factores, como la estructura del suelo, la topografía y las prácticas de manejo agrícola. Técnicas de manejo del agua, como el riego alternando moje y secado (AWD, por la sigla en inglés de *alternate wetting and drying*) y el control de los niveles de agua en los arrozales, pueden optimizar esta función ecosistémica (Gao et al., 2024; Islam et al., 2020; Rejesus et al., 2011). A escala global, el AWD reduce el uso de agua de riego en 33,88 % y mejora la eficiencia del uso del agua, del uso del agua de riego y de la productividad del agua en 20,27 %, 47,58 % y 29,63 %, respectivamente (Gao et al., 2024). Investigaciones recientes han demostrado que los sistemas de cultivo de arroz bien gestionados pueden aumentar significativamente la eficiencia del uso del agua al reducir las pérdidas por evaporación y escorrentía. Esto no solo beneficia la producción agrícola, sino que también contribuye a la sostenibilidad de los recursos hídricos en regiones propensas a la escasez de agua.

Apoyo a la recarga de acuíferos

Los cultivos de arroz pueden contribuir a la recarga de acuíferos subterráneos y, por lo tanto, asegurar la disponibilidad de recursos hídricos a largo plazo. La recarga gestionada de acuíferos agrícolas (Ag-MAR) consiste en una técnica emergente que permite distribuir grandes volúmenes de agua en tierras agrícolas, con un alto potencial de implementación global (Facchi et al., 2020; Levintal et al., 2022). La siembra directa de arroz, tanto en condiciones secas como húmedas, es un método eficiente que no solo ahorra agua de riego, sino que también promueve una percolación más profunda del agua, lo cual contribuye a recargar las aguas subterráneas.

Aunque en contextos convencionales la percolación excesiva se considera una pérdida hídrica y de nutrientes, en esquemas bien gestionados puede representar un cobeneficio ecosistémico mediante la recarga de acuíferos. Esta estrategia, conocida como recarga gestionada de acuíferos agrícolas (Ag-MAR), busca aprovechar la percolación controlada para incrementar la sostenibilidad

hídrica en zonas con sobreexplotación subterránea (Levintal et al., 2022). Si bien aún faltan estudios específicos que cuantifiquen este proceso mediante balance hídrico o modelado en sistemas arroceros bajo diferentes métodos de establecimiento, su potencial es reconocido como una vía complementaria para la resiliencia hídrica agrícola.

Biodiversidad

Los sistemas agrícolas de arroz crean humedales modificados por el hombre que son vitales para la vida silvestre, incluyendo numerosos vertebrados no domesticados. Estos humedales proporcionan "servicios de apoyo" esenciales para la biodiversidad y el mantenimiento de diversas especies. Los campos de arroz actúan como hábitat alternativo para muchas especies de anfibios, particularmente ranas, en ausencia de humedales naturales (Propper et al., 2023). Los anfibios ayudan en el control de plagas y en el ciclo de nutrientes y actúan como biomonitores, es decir, señalan la presencia de sustancias químicas peligrosas en los agroecosistemas (Fang et al., 2021; Lin & Wu, 2020). Además, la presencia de ranas en los arrozales puede reducir la necesidad de pesticidas y aumentar el rendimiento del arroz.

Aunque el modelo productivo actual prioriza el uso eficiente del agua en el cultivo de arroz, diversos estudios destacan que mantener periodos estratégicos de inundación en ciertas etapas o áreas puede generar beneficios ecológicos adicionales. Por ejemplo, Propper et al. (2023) muestran que los arrozales inundados temporalmente proporcionan hábitats valiosos para aves acuáticas, lo cual contribuye a la conservación de especies raras como el ibis gigante (*Thaumatibis gigantea*) y sirve como lugares de escala para aves migratorias. Las aves acuáticas mejoran el reciclaje de nutrientes y controlan plagas como el caracol manzana dorado (*Pomacea canaliculata*), de manera que se reduce la necesidad de fertilizantes y pesticidas (Navedo et al., 2015). Estas prácticas, cuando se integran de manera controlada en esquemas de manejo adaptativo, permiten compatibilizar la conservación de biodiversidad con una gestión hídrica eficiente.

En la tabla 9.1 se detallan los servicios ecosistémicos proporcionados por diferentes taxones en los arrozales (Propper et al., 2023). Cabe señalar que estos servicios ecosistémicos subrayan la importancia de los arrozales como ecosistemas multifuncionales que sustentan la biodiversidad y mejoran la sostenibilidad agrícola.

Tabla 9.1. Tipos de servicios ecosistémicos identificados en la revisión de literatura para cada taxón encontrado en los campos de arroz

Taxón	Servicio ecosistémico	Resultado específico
Anfibios (ranas)	Regulación.	Control de plagas y vectores.
	Aprovisionamiento.	Ciclo alimentario/económico del nitrógeno.
	Bioindicadores.	Monitoreo de pesticidas.
	Cultural.	Indicadores de disponibilidad de agua para la siembra.
Aves (pájaros)	Regulación.	Control de plagas y vectores.
	Aprovisionamiento.	Ciclo alimentario/económico del nitrógeno.
	Cultural.	Símbolos de buena suerte.
Quirópteros (murciélagos)	Regulación.	Control de plagas y vectores.
	Aprovisionamiento.	Ciclo alimentario/económico del nitrógeno.
	Bioindicadores.	Vigilancia de plagas.
Roedores (ratas y ratones)	Regulación.	Control de plagas/ingeniería de ecosistemas.
	Aprovisionamiento.	Ciclo alimentario/económico del nitrógeno.

Fuente: Adaptado del estudio de Propper et al. (2023).

Suministro de productos acuáticos

Los arrozales pueden ofrecer productos acuáticos como peces, crustáceos y moluscos que prosperan en los campos inundados (Xu et al., 2021). Aunque la integración de peces en arrozales no es una práctica globalmente extendida, se observa principalmente en países asiáticos como Filipinas, Indonesia y Japón, donde las técnicas tradicionales de cultivo de arroz han evolucionado durante siglos. En estos países, el arroz es el cultivo principal y de mayor relevancia económica, mientras que la inclusión de peces proporciona ingresos adicionales y una valiosa fuente de proteínas. Sin embargo, la integración de peces en arrozales implica un esfuerzo adicional para los agricultores y requiere una evaluación cuidadosa.

En Colombia, la piscicultura ocupa solo 2.130 ha, de las cuales el 98,67 % corresponde a granjas que operan con estanques en tierra, usualmente de pequeña escala y distribuidos en múltiples predios, lo que refleja una alta dispersión espacial y fragmentación productiva del sector. Solo el 1,33 % emplea jaulas flotantes en cuerpos de agua. Específicamente, Tolima alberga la mayor cantidad de granjas con estanques, mientras que Meta y Huila cuentan con las mayores áreas de espejo de agua (Gobernación del Huila, 2023).

Huella de carbono

El cultivo de arroz, particularmente en sistemas inundados, es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano (Rajendran et al., 2024). Sin embargo, adoptar prácticas de manejo sostenible puede reducir considerablemente la huella de carbono asociada con la producción de arroz. Técnicas como el riego intermitente, la siembra directa y el uso de variedades de arroz de bajo metano son efectivas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, pues las variedades de arroz de alto rendimiento tienden a emitir menos metano en comparación con las de bajo rendimiento (Balakrishnan et al., 2018). La reducción de la huella de carbono en el cultivo de arroz es esencial para combatir el cambio climático y promover la sostenibilidad ambiental.

Servicios culturales

Los cultivos de arroz poseen un profundo significado cultural y social en el VCAM. Estos paisajes agrícolas no solo son fundamentales para la producción de alimentos, sino que también forman parte integral del patrimonio cultural y las tradiciones locales. Los campos de arroz, con su atractivo paisaje, pueden captar el interés de turistas interesados en la agricultura tradicional, la biodiversidad y la cultura local. Programas de turismo rural y visitas educativas a los arrozales pueden generar ingresos adicionales para las comunidades rurales y fomentar una mayor conciencia sobre la agricultura sostenible y la conservación del medioambiente (Tekken et al., 2017). Además, el reconocimiento de la cultura arrocera en Colombia, a través de procesos de empoderamiento, ha suscitado un renovado interés en la importancia continua de esta actividad. Este reconocimiento ha permitido que las regiones arroceras sean valoradas como componentes importantes de los paisajes agropecuarios (Borda, 2021).

Ciclos de nutrientes

Durante su crecimiento, el arroz absorbe nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio del suelo, los cuales son fundamentales para su desarrollo y rendimiento. Con prácticas de manejo sostenible, como la rotación de cultivos y la incorporación de restos de cosecha, los nutrientes pueden reciclarse eficientemente para mejorar la fertilidad del suelo y reducir la necesidad de fertilizantes químicos.

La gestión adecuada del ciclo de nutrientes en los arrozales es esencial para mantener la productividad a largo plazo y la salud del suelo. Estudios han demostrado que la integración de técnicas como el uso de biofertilizantes, la siembra de leguminosas y la aplicación de compost puede mejorar significativamente la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo (Kumawat et al., 2024). Estas prácticas no solo aumentan los rendimientos de los cultivos de arroz, sino que también contribuyen a la sostenibilidad del ecosistema

agrícola al minimizar las pérdidas de nutrientes por lixiviación y erosión. Además, optimizar el uso de fertilizantes e implementar prácticas agrícolas sostenibles puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso, y disminuir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nitratos y fosfatos. En síntesis, promover un ciclo de nutrientes eficiente y sostenible es clave para lograr un equilibrio entre la productividad agrícola y la conservación ambiental, de tal manera que se asegure la sostenibilidad del cultivo de arroz a largo plazo.



Referencias

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate: A high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015 [Data set]. *Scientific Data*, 5, Article 170191. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191

AboDalam, H., Devra, V., Ahmed, F. K., Li, B., & Abd-Elsalam, K. A. (2022). Chapter 29—Rice wastes for green production and sustainable nanomaterials: An overview. En K. A. Abd-Elsalam, R. Periakaruppan, & S. Rajeshkumar (Eds.), *Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials* (pp. 707-728). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823575-1.00009-3

Agencia de Desarrollo Rural [ADR]. (2024, 26 de marzo). *Distritos de riego activos*. https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Distritos-de-Riego-activos/rtxu-twjm/about_data

Agencia de Desarrollo Rural [ADR]. (s. f.). *Adecuación de tierras*. https://www.adr.gov.co/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/adecuacion-de-tierras/

Aguilar-Ariza, A. (2019). *Machine learning and big data techniques for satellite-based rice phenology monitoring* [Master's thesis, The University of Manchester]. Repositorio Institucional. https://research.manchester.ac.uk/en/studentTheses/machine-learning-and-big-data-techniques-for-satellite-based-rice

Ainsworth, E. A., Beier, C., Calfapietra, C., Ceulemans, R., Durand-Tardif, M. Y., Farquhar, G. D., Finzi, A. C., Karnosky, S. G., Kumagai, E., Leakey, A. D., Long, S. P., Norby, R. J., Olin, S., Reyes, N. O., Rogers, A., Sanadze, G. A., Stitt, M., DeLucia, E. H., & White, J. W. (2008). Next generation of elevated [CO2] experiments with crops: A critical investment for feeding the future world. *Plant, Cell & Environment*, *31*(9), 1317–1324. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01878.x

Allen, R., Pereira, S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: A guideline for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper No 56*. FAO Water Resources, Development and Management Service.

Amador, M., J. C., & Bernal, I. E. (2012). *Curva de absorción de nutrientes del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) variedad Venezuela 21, en un suelo vertisol bajo condiciones del Valle de Sébaco, Nicaragua* [Tesis de licenciatura en Agronomía, Zamorano]. Repositorio Institucional. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/22eee8cf-eccb-4e4e-a268-a29020e97e2d/content

Anisuzzaman, M., Rafii, M. Y., Jaafar, N. M., Izan Ramlee, S., Ikbal, M. F., & Haque, M. A. (2021). Effect of organic and inorganic fertilizer on the growth and yield components of traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) genotypes in Malaysia. *Agronomy*, *11*(9), 1830. https://doi.org/10.3390/agronomy11091830

Apriyana, Y., Surmaini, E., Estiningtyas, W., Pramudia, A., Ramadhani, F., Suciantini, S., Susanti, E., Purnamayani, R., & Syahbuddin, H. (2021). The integrated cropping calendar information system: A coping mechanism to climate variability for sustainable agriculture in Indonesia. *Sustainability*, *13*(11), 6495. http://dx.doi.org/10.3390/su13116495

Arguissaín, G., & Kraemer, A. (2011). Impacto ambiental de la adopción del arroz resistente a las imidazolinonas en sistemas contrastantes de América Latina. Argentina. *Revista Arroz. Publicación de la Asociación Cultivadores de Arroz del Uruguay*, *15*(66).

Arouna, A., Dzomeku, I. K., Shaibu, A.-G., & Nurudeen, A. R. (2023). Water management for sustainable irrigation in rice (*Oryza sativa* L.) production: A review. *Agronomy*, *13*(6), 1522. https://doi.org/10.3390/agronomy1306152

Arsha, R. S., Rasane, P., & Singh, J. (2021). Rice: Bioactive compounds and their health benefits. *The Pharma Innovation Journal*, *10*(5), 845-853.

Asci, S., Borisova, T., & Van Sickle, J. J. (2015). Role of economics in developing fertilizer best management practices. *Agricultural Water Management*, *152*, 251–261. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.021

Ashraf, M., & Harris, P. (Eds.). (2005). *Abiotic stresses: Plant resistance through breeding and molecular approaches*. CRC Press.

Asociación Colombiana de Semillas y Biotecnología [Acosemillas]. (2021). "Semillas certificadas garantizan la seguridad alimentaria en Colombia": Acosemillas. https://acosemillas.org/semillas-certificadas-garantizan-la-seguridad-alimentaria-en-colombia-acosemillas/

Atique-ur-Rehman, Sarwar, N., Ahmad, S., Khan, M.A., & Hasanuzzaman, M. (2022). World rice production: An overview. En N. Sarwar, Atique-ur-Rehman, S. Ahmad & M. Hasanuzzaman (Eds.), *Modern techniques of rice crop production* (pp. 3-12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4955-4_1

Atwill, R. L., II. (2021). *Evaluation of alternate wetting and drying irrigation management in rice* [Tesis de maestría, Mississippi State University]. Repositorio Institucional. https://scholarsjunction.msstate.edu/td/5372

Ávila, L. A. D., Marchezan, E., Machado, S. L. D. O., & Silva, R. P. D. (2000). Red rice seed bank evolution under different systems of lowland utilization. *Planta Daninha*, *18*(2), 217–230. https://awsjournal.org/article/red-rice-seed-bank-evolution-under-different-systems-of-lowland-utilization/

Awanis, S., & Purwanto, E. (2021). Morphophysiological characteristics and yields of black rice (*Oryza sativa* L. Indica) induced by gamma rays 100 gy at M^3 generation. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *637*(1), 012078. https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012078

Aydın, M. H. (2022). *Rhizoctonia solani* and its biological control. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, *9*(1), 118–135. https://doi.org/10.19159/tutad.1004550

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* [FAO Irrigation and Drainage Paper, N.º 29, Rev. 1]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm

Balakrishnan, D., Kulkarni, K., Latha, P. C., & Subrahmanyam, D. (2018). Crop improvement strategies for mitigation of methane emissions from rice. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *30*(6), 451–462. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20193359335

Bao, J. (2019). Rice starch. En J. Lu & H. Jiang (Eds.), *Rice: Chemistry and technology* (pp. 55–108). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00003-4

Baradas, M. W. (1994). Crop requirements of tropical crops. En J. F. Griffiths (Ed.), *Handbook of agricultural meteorology* (pp. 189–202). Oxford University Press.

Barrios-Pérez, C. (2016). *Zonificación agroecológica para el cultivo de arroz de riego (Oryza sativa L.) en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Tokio]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28064.79361/1

Bellvert, J., Marsal, J., Mata, M., & Girona, J. (2012). Identifying irrigation zones across a 7.5-ha 'Pinot noir' vineyard based on the variability of vine water status and multispectral images. *Irrigation Science*, *30*, 499–509. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0380-y

Benacchio, S. S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano.* FONAIAP; Centro Nacional de Investigación Agropecuarias; Ministerio de Agricultura y Cría.

Bennett, R. (2016). *Assessing water appropriation and equity in the Coello and Bermellon watersheds: Application of Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM)* [White paper]. University of British Columbia. https://lfs-mlws-2020.sites.olt.ubc.ca/files/2020/04/Bennett-2016-Assessing-Water-Appropriation-and-Equity-in-the-Coello-and-Bermellon-Watersheds-Colombia.pdf

Betancur, L. G. (2011). Manejo integrado del añublo bacterial de la panícula del arroz (*Oryza sativa* L.) causado por *Burkholderia glumae* Kurita & Tabei: Una revisión. *Agronomía*, *19*(1), 79–90. http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia19(2)_8.pdf

Bezerra, G. de A., Chaibub, A. A., Oliveira, M. I. de S., Mizubuti, E. S. G., & Filippi, M. C. C. de. (2021). Evidence of *Pyricularia oryzae* adaptability to tricyclazole. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, *56*(10), 869–876. https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1971913

Boman, B., Parsons, L., Obreza, T., & Stover, E. (2002). Citrus water use and irrigation scheduling. En B. J. Boman (Ed.), *Water and Florida Citrus* (pp. 175–191). University of Florida; Institute of Food and Agricultural Sciences. https://www.researchgate.net/profile/Ed-Stover/publication/268053359_Chapter_17_Citrus_Water_Use_and_Irrigation_Scheduling/links/551a986f0cf26cbb81a30575/Chapter-17-Citrus-Water-Use-and-Irrigation-Scheduling.pdf

Booth, D. B., Murphy, S. D., & Swanton, C. J. (2003). *Weed ecology in natural and agricultural systems*(1st Ed.). CABI Publishing.

Borda, A. C. (2021). *Desarrollo de cadenas de valor de arroz con potencial restaurador del paisaje para el departamento del Tolima* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11144

Bouman, B. A. M., Lampayan, R. M., & Tuong, T. P. (2007). *Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity*. International Rice Research Institute. http://books.irri.org/9789712202193_content.pdf

Boydell, B., & McBratney, A. B. (2002). Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. *Precision Agriculture*, *3*(1), 9–23. https://doi.org/10.1023/A:1013318002609

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14th ed.). Pearson.

Briones, A. A. (1969). *Physical properties of paddy soils*. International Rice Research Institute.

Bruzzone, C., & Heros, E. (2011). *Manejo integrado en producción y sanidad de arroz* [Guía técnica]. Universidad Nacional Agraria La Molina; Agrobanco. https://es.scribd.com/doc/113234672/Manejo-Integrado-en-La-Produccion-y-Sanidad-Del-Arroz

Bullock, D. S., Kitchen, N., & Bullock, D. G. (2007). Multidisciplinary teams: A necessity for research in precision agriculture systems. *Crop Science*, *47*(5), 1765–1769. https://doi.org/10.2135/cropsci2007.05.0280

Bustos López, M. C. (2012). *Destino ambiental del glifosato en una zona arrocera del Tolima, Colombia* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10422

Buttafuoco, G., Castrignanò, A., Cucci, G., Lacolla, G., & Lucà, F. (2017). Geostatistical modelling of within-field soil and yield variability for management zones delineation: A case study in a durum wheat field. *Precision Agriculture*, *18*(1), 37–58. https://doi.org/10.1007/s11119-016-9462-9

Cabanillas Pablo, M. L. (2018). *Control químico de Tagosodes orizicolus Muir en el cultivo de Oryza sativa L. en Pueblo Nuevo, Chepén, La Libertad* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNITRU. https://dspace.unitru.edu.pe/bitstreams/87624935-c9c3-40df-9f8b-a2f09007fb2b/download

Calderón-Páez, S. E., Cueto-Niño, Y. A., Sánchez-Reinoso, A. D., Garces-Varon, G., Chávez-Arias, C. C., & Restrepo-Díaz, H. (2021). Foliar boron compounds applications mitigate heat stress caused by high daytime temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, *44*(17), 2514–2527.

Carrijo, D. R., Lundy, M. E., & Linquist, B. A. (2017). Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research*, *203*, 173–180. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.002

Castillo, A., Pineda, D., Ospina, J., Echeverry, J., Perafán, R., Garcés, G., Sierra, J., & Díaz, A. (2010). Cambio climático y producción de arroz. *Revista Arroz*, *58*(489), 4–11. https://fedearroz-website.s3.amazonaws.com/media/documents/Revista_489.pdf

Castro-Borbor, Á. R. (2011). *Altura del daño ocasionado por larvas de Rupela albinella (Cramer), en tres variedades de arroz, bajo tres sistemas de manejo de agua* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. DSpace UTB. https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/87

Cebrián-Piqueras, M., Karrasch, L., & Kleyer, M. (2017). Coupling stakeholder assessments of ecosystem services with biophysical ecosystem properties reveals importance of social contexts. *Ecosystem Services*, *23*, 108–115. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.009

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

Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT]. (2021, 2 de diciembre). Semillas de arroz de origen CIAT, el complemento perfecto para la siembra directa. Alianza Bioversity International y CIAT. https://alliancebioversityciat.org/es/stories/semillas-de-arroz-de-origen-ciat-el-complemento-perfecto-para-la-siembra-directa

Cereal Systems Initiative for South Asia [CSISA]. (2011). No-till and unpuddled mechanical transplanting of rice. https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/119a0072-8884-4820-8025-0d2919318b76/content

Chaali, N., Bravo, D., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Beltrán-Medina, J. I., Serralde-Ordoñez, D. P., & Benavides-Erazo, J. (2022). New insights into arsenic and cadmium distribution and origin in paddy soils using electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, *202*, 104638. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104638

Chaali, N., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Carrillo, G. A. A., & Pedraza, E. Á. Á. (2020). Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) roots in upland production areas. *Scientia Horticulturae*, *272*, 109533. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109533

Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, *30*(3), 239–264. https://doi.org/10.1071/FP02076

Chemura, A. (2014). The growth response of coffee (Coffea arabica L) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, *3*, 3-11. https://doi.org/10.1007/s40093-014-0059-x

Chen, Z. D., Li, F. B., Xu, C. C., Ji, L., Feng, J. F., & Fang, F. P. (2022). Spatial and temporal changes of paddy rice ecosystem services in China during the period 1980–2014. *Journal of Integrative Agriculture*, *21*(10), 3082–3093. https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.07.049

Chen, Z., Wu, Y., Ti, J., Chen, F., & Li, Y. (2015). Carbon efficiency of double-rice production system in Hunan Province, China. *PubMed*, *26*(1), 87-92. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25985657

Cherry, R., Odero, C., Karounos, M., & Fernández, J. (2018). Insecticidal control for the rice stink bug (Hemiptera: Pentatomidae) complex found in Florida rice. *Journal of Entomological Science*, *53*(3), 372–378. https://doi.org/10.18474/JES17-126.1

Chilian, J. (2018). Masificación del arroz Clearfield en America del Sur. *Tierra Adentro*, *110*, 54-57. https://hdl.handle.net/20.500.14001/5442

Clavijo, J. (2010). Acción de los herbicidas en un arrozal: Modo y mecanismos. En V. M. Degiovanni Beltramo, C. P. Martínez Racines, & F. Motta (Eds.), *Producción ecoeficiente del arroz en América Latina*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Climate Prediction Center, National Weather Service [CPC-NOOA]. (2024). Cold and warm episodes by season. http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v4.shtml

Cobb, A. H. (2022). *Herbicides and plant physiology*. John Wiley & Sons.

Corporación Autónoma Regional de Tolima [Cortolima]. (2018). Plan integral de gestión del cambio climático territorial del Tolima "Ruta Dulima. El Tolima enfrenta el cambio en el clima" [Documento Técnico de Soporte]. Subdirección de Planeación y Gestión Tecnológica; Cortolima. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/PNACC/PIGCCT%20Tolima.pdf

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosava. (2016). Sistema de apoyo para la toma de decisión agroclimáticamente inteligente [SE-MAPA] V2.1. https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/l%C3%ADnea-agr%C3%ADcola/cultivos-transitorios-y-agroindustriales/sistemas-de-informaci%C3%B3n/723-sistema-experto-mapa

Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., & Shinozaki, K. (2011). Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective. *BMC plant biology*, *11*(1), 163.

Croughan, T. P. (2003). Clearfield rice: It's not a GMO. *Louisiana Agriculture*, *46*(4), 24–26. https://www.lsuagcenter.com/portals/communications/publications/agmag/archive/2003/fall/clearfield-rice-its-not-a-gmo

Cruzate, G. A., & Casas, R. (2009). Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas*, *44*, 21–26. https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2009/12/21.pdf

Cuevas, A., Salive, A., Puentes, B., & Bastidas, H. (2003). *Manejo integrado de malezas*. Fedearroz.

Da Silva Almeida, L., & Carvalho Ghimarães, E. (2016). Geostatistics and exploratory factor analysis for representation of soil chemical attributes in coffee growing. *Coffee Science*, *Lavras*, *11*(2), 195-203.

De Souza, J. R., Pereira, F. A. da S., Lima, M. H. F., De M. Neto, A. J., Santiago, C. M., Abreu, G. B., & Barrigossi, J. A. F. (2022). Estratégias de manejo integrado para *Rupela albinella* Cramer (Lepidoptera: Crambidae) na cultura do arroz na região da Baixada Maranhense, Brasil. En *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Entomologia*. Sociedade Entomológica do Brasil. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1149918

Dekagro. (s. f.). *Rice fertilization guide*. Dekagro. https://www.dekagro.gr/en/fertilization/rice-fertilization-guide/

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], & Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2017). Evaluaciones agropecuarias municipales. https://www.agronet.gov.co/Documents/TOLIMA_2017.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], & Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2023). Quinto Censo Nacional Arrocero (5° CNA 2023a). https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-arrocero#:~

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2023). Cuenta satélite de la agroindustria del arroz (CSAA). https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-satelite/cuenta-satelite-piloto-de-la-agroindustria#cuenta-satelite-de-la-agroindustria-del-arroz-csaa

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2024). Índice de precios al consumidor (IPC). https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc

Díaz Ramírez, A. I. (2015). *Potencial de manejo post-emergente de malezas con alternativas de extractos vegetales* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/7671

Díaz, G. S., Ruiz, M., Álvarez, G., & Castillo, A. (2009). Estudio de diferentes prácticas agrícolas para buscar sostenibilidad en la producción arrocera. *Cultivos Tropicales*, *30*(1), 5–11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362009000100001&script=sci_arttext

Diem, P. K., Diem, N. K., Nguyen, C. T., & Minh, V. Q. (2024). Impacts of extreme drought on rice planting calendar in Vietnamese Mekong Delta. *Paddy and Water Environment*, *22*(1), 139–153. https://doi.org/10.1007/s10333-023-00958-2

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria [Dicta]. (2006). *Métodos de siembra en arroz*. Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). https://dicta.gob.hn/files/2006,-Metodos-de-siembra-en-arroz,-F.pdf

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos* [Estudio FAO: Riego y Drenaje N.º 33]. FAO. https://www.researchgate.net/publication/230888005_Efectos_del_agua_sobre_el_rendimiento_de_los_cultivos

Dubberstein, D., Partelli, F. L., Días, J. R. M., & Espindola, M. C. (2016). Concentration and accumulation of macronutrients in leaf of coffee berries in the Amazon, Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, *10*(5), 701–710. https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7424

Durand-Morat, A., & Bairagi, S. (2022). *International Rice Outlook: International Rice Baseline Projections 2021–2031*. International Rice Research Institute; University of Arkansas. https://scholarworks.uark.edu/aaesrb/53/

Ehlers, W., & Goss, M. (2003). *Water dynamics in plant production*. CABI Press.

Ekanayake, I. J., Datta, S. D., & Steponkus, P. L. (1989). Spikelet sterility and flowering response of rice to water stress at anthesis. *Annals of Botany*, *63*(2), 257–264. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087740

Espinoza, R. (2003). *El arroz rojo: Maleza en el cultivo de arroz*. Ceniap.

EVA-UPRA. (2022). *Información de municipios, SICA de la Federación Nacional de Cafeteros, ENAM-DANE, Fedearroz y agremiaciones de productores locales*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA).

Evett, S. R., Schwartz, R. C., Casanova, J. J., & Heng, L. K. (2012). Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management*, *104*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002

Facchi, A., Negri, C., Rienzner, M., Chiaradia, E., Romani, M. (2020). Groundwater recharge through winter flooding of rice areas. In A. Coppola, G., Di Renzo, G., Altieri, & P., D'Antonio (Eds.), *Innovative biosystems engineering for sustainable agriculture, forestry and food production* [Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 67] (pp. 77-87). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39299-4_9

Fang, K., Dai, W., Chen, H., Wang, J., Gao, H., Sha, Z., & Cao, L. (2021). The effect of integrated rice–frog ecosystem on rice morphological traits and methane emission from paddy fields. *Science of The Total Environment*, *783*, 147123. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147123

Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2012). *Adopción Masiva de Tecnología – AMTEC*. Fedearroz. https://fedearroz-website.s3.amazonaws.com/media/documents/cartilla_AMTEC.pdf

Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2018). *El manejo de las malezas en el Programa AMTEC*. Fedearroz.

Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2020). *Guía técnica para el manejo integrado de plagas en el cultivo de arroz*. Fedearroz.

Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2023). *Estadísticas arroceras*. https://www.fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/

Federación Nacional de Arroceros [Fedearroz]. (2024). *Estadísticas arroceras*. https://fedearroz.com.co/es/nuestros-productos/semilla-certificada/

Feng, L., Dai, J., Tian, L., Zhang, H., Li, W., & Dong, H. (2017). Review of the technology for high-yielding and efficient cotton cultivation in the northwest inland cotton-growing region of China. *Field Crops Research*, *208*, 18-26.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Fernández, A. (2017). Efecto del uso de lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua en el cultivo de Oryza Sativa (Arroz). *Sciéndo Ingenium*, *12*(3), 67-76. https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/1403

Fernández, M. D., Thompson, R. B., Bonachela, S., Gallardo, M., & Granados, M. R. (2012). Uso del agua de riego en los cultivos de invernadero. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*, *3*, 115–138.

Fernando, M., & Shrestha, A. (2023). El potencial de los cultivos de cobertura para el manejo de malezas: ¿Una única herramienta o componente de un sistema integrado de manejo de malezas? *Plantas*, *12*(4), 752. https://doi.org/10.3390/plants12040752

Fleming, K. L., Westfall, D. G., & Bausch, W. C. (2000). Evaluating management zone technology and grid soil sampling for variable rate nitrogen application. En W. E. Larson, P. C. Robert & R. H. Rust (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture* (pp. 16–19). ASA-CSSA-SSSA.

Fondo de Financiamiento para el Sector Agropecuario [Finagro]. (2017). *Arroz - riego: Marco de referencia agroeconómico* (2017). https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/arroz_riego.pdf

Fonseca-Fino, F., & Aguilar-Corrales, D. A. (Dirs.). (2020). *Plan de ordenamiento productivo del arroz en Colombia 2020-2038*. https://upra.gov.co/es-co/Documents/01_Proyectos_Normativos/202001_ARROZ%20VERIFICADO%20CLIENTEnov19_20201215_V2.pdf

Fornasiero, A., Wing, R. A., & Ronald, P. (2022). Rice domestication. *Current Biology*, *32*(1), R20–R24. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.11.025

Franco, H. E. C. (1996). *Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del valle cálido del Alto Magdalena*. Corpoica. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12782

Freeman, J., & Ward, E. (2004). Gaeumannomyces graminis, the take-all fungus and its relatives. *Molecular Plant Pathology*, *5*(4), 235–252. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00226.x

Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W. (2004). Management zone analyst (MZA) software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, *96*(1), 100–108. https://doi.org/10.2134/agronj2004.1000

Fu, B., Wang, S., Su, C., & Forsius, M. (2013). Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *5*(1), 4–10. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.12.002

Fuentes, C. (2010). Manejo de las malezas del arroz en América Latina: Problemas y soluciones. En V. Deviogani, C. P. Martínez, & F. Motta, *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina.* CIAT-Centro Internacional de Agricultura. https://tinyurl.com/39mn8e5m

Fuentes, C. L., & Romero, C. E. (1991). Una visión del problema de las malezas en Colombia. *Agronomía Colombiana*, *8*(2), 364-378.

Gao, L. Z., Jin, Z. Q., & Li, L. (1987). A climatic classification for rice production in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *39*, 55–65.

Gao, R., Zhuo, L., Duan, Y., Yan, C., Yue, Z., Zhao, Z., & Wu, P. (2024). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water-saving, and emission reduction in rice fields: A global meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, *353*, 110075. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110075

Garcés, A. (2009). *Diagnóstico de gestión tecnológica del cultivo del arroz en la región de Venadillo, Tolima: siembra tecnificada versus siembra tradicional* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio PUJ. http://hdl.handle.net/10554/9114

Garcés, G., & Medina, J. (2018). *Fisiología del cultivo del arroz en el programa AMTEC*. Fondo Nacional del Arroz. https://fedearroz-website.s3.amazonaws.com/media/documents/cartilla_fisiologia.pdf

García Quiroga, E. (2018). *Implicaciones de la producción continua de arroz: ventajas de la rotación de cultivos*. AGROSAVIA. http://hdl.handle.net/20.500.12324/30602

García, M., Cañizares, A., Salcedo, F., & Guillén, L. (2000). Un aporte a la determinación del período crítico de interferencia de malezas en cafetales del estado Monagas. *Bioagro*, *12*(3), 63-70. https://www.redalyc.org/pdf/857/85712301.pdf

Gavioli, A., De Souza, E. G., Bazzi, C. L., Schenatto, K., & Betzek, N. M. (2019). Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods. *Biosystems Engineering*, *181*, 86–102. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.02.019

Ghosh, S., Datta, K., & Datta, S. K. (2019). Rice vitamins. En J. Bao (Ed.), *Rice: Chemistry and technology* (4.ª ed.; pp. 195-220). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00007-1

Gobernación del Huila. (2023). Acuerdo de productividad y competitividad piscícola del Departamento del Huila 2023–2040. https://www.huila.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=87646&id_comunidad=agricultura-y-mineria

Gobernación del Huila, & Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2022). *Plan departamental de riego del Huila*. https://www.huila.gov.co/documentos/1727/plan-departamental-de-riegos/

González, A. Q., & Santamaría, F. G. (2014). *Burkholderia glumae* en el cultivo de arroz en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, *25*(2), 371-381. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212014000200015

González, M., & Alonso, A. M. (2016). Tecnologías para ahorrar agua en el cultivo de arroz. *Nova*, *14*(26), 63–78. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702016000200007

Gutiérrez, A. P., Ponti, L., D'Oultremont, T., & Ellis, C. K. (2008). Climate change effects on poikilotherm tritrophic interactions. *Climatic Change*, *87*(Suppl 1), 167-192. https://doi.org/10.1007/s10584-007-9379-4

Guzmán G, M. P., Sánchez, A. M., & Hernández G, F. J. (2020). *AMTEC alternativa para la competitividad y sostenibilidad* [Ponencia, Feria Técnica Nacional]. Fedearroz-FNA.

Hardke, J. T., Lorenz, G. M., & Leonard, R. (2015). Fall armyworm (*Lepidoptera*: Noctuidae) ecology in Southeastern cotton. *Journal of Integrated Pest Management*, *6*(1), 10. https://doi.org/10.1093/jipm/pmv009

Hasan, K., Abdullah, A. H., Bhattacharjee, D., & Afrad, S. I. (2016). Impact of alternate wetting and drying technique on rice production in the drought prone areas of Bangladesh. *Indian Research Journal of Extension Education*, *16*(1), 39–48. https://www.researchgate.net/publication/317046550_Impact_of_Alternate_Wetting_and_Drying_Technique_on_Rice_Production_in_the_Drought_Prone_Areas_of_Bangladesh

Hawerroth, C., Araujo, L., & Rodrigues, F. Á. (2017). Infection process of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* on the roots and culms of rice. *Journal of Phytopathology*, *165*(10), 692-700. https://doi.org/10.1111/jph.12608

Heinrichs, E., & Muniappan, R. (2017). IPM for tropical crops: Rice. *Cab Reviews*, *12*, 1-31. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/PAVSNNR201712030

Herbicide Resistance Action Committee [HRAC] (2021). *Nuevo sistema de clasificación de los herbicidas por su modo de acción*. HRAC. https://hracglobal.com/europe/files/HRAC-Classification-System-2021_Spanish.pdf

Hernández-Quiñónez, J. A., Salazar-Mercado, S. A., & Rodríguez-Araújo, E. (2021). Efecto de los elementos menores en la calidad molinera del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad F-2000. *Mutis*, *11*(1), 8–21. https://doi.org/10.21789/22561498.1711

Hickel, E. R., Prando, H. F., & Eberhardt, D. S. (2013). *A bicheira-da-raiz nas lavouras catarinenses de arroz irrigado: Ocorrência, monitoramento y manejo integrado* [Boletin Técnico, N.º 161]. Epagri. https://www.researchgate.net/publication/317475504_A_bicheira-da-raiz_nas_lavouras_catarinenses_de_arroz_irrigado_ocorrencia_monitoramento_e_manejo_integrado

Hollier, C. A., Rush, M. C., & Groth, D. E. (2009). *Sheath Blight of Rice* [*Louisiana Plant Pathology Disease Identification and Management Series*, N.º 3123]. LSU AgCentre Research & Extension. https://www.lsuagcenter.com/NR/rdonlyres/C93A494B-8105-4804-9DFA-81190EC3F68B/58166/pub3123ShealthBlightofRiceHIGHRES.pdf

Horn, R., & Smucker, A. (2005). Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research*, *82*(1), 5–14. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.002

Hosseyni-Moghaddam, M., & Soltani, J. (2013). An investigation on the effects of photoperiod, aging and culture media on vegetative growth and sporulation of rice blast pathogen *Pyricularia oryzae*. *Progress in Biological Sciences*, *3*(2), 135-143. https://doi.org/ 10.22059/pbs.2013.35843

Hussain, S., Huang, J., Huang, J., Ahmad, S., Nanda, S., Anwar, S., Shakoor, A., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Rice production under climate change: Adaptations and mitigating strategies. En S. Fahad, M. Hasanuzzaman, M. Alam, H. Ullah, M. Saeed, I. A. Khan & M. Adnan (Eds.), *Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 659–686). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_26

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2023a). Fichas técnicas de cultivares: Arroz. https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/certificacion-de-semillas/fichas-tecnicas-de-cultivares/ficha-tecnica-arroz-ok.aspx

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2023b, 31 de marzo). Usar semilla de calidad es un buen negocio, genera hasta un 40 % más en las cosechas. https://www.ica.gov.co/noticias/usar-semilla-de-calidad-es-un-buen-negocio?aliaspath=%2fNoticias%2fusar-semilla-de-calidad-es-un-buen-negocio

Instituto Colombiano de Desarrollo Rural [Incoder]. (2005). *Resolución 1399 de 2005, por la cual se expide el reglamento que define los criterios generales para la entrega de los Distritos de Adecuación de Tierras para su administración, operación y conservación por parte de las Asociaciones de Usuarios.* Diario Oficial N.º 45.992 del 6 de agosto de 2005. https://normograma.sena.edu.co/normograma/docs/resolucion_incoder_1399_2005.htm

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2021). Estadísticas hidrológicas y climáticas de Colombia. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2022). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. https://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1994). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Huila*. IGAC.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento de Tolim*a. IGAC.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (Eds.), *Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

Islam, S. F., Sander, B. O., Quilty, J. R., De Neergaard, A., Van Groenigen, J. W., & Jensen, L. S. (2020). Mitigation of greenhouse gas emissions and reduced irrigation water use in rice production through water-saving irrigation scheduling, reduced tillage and fertiliser application strategies. *Science of The Total Environment*, *739*, 140215. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140215

Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jaramillo-Barrios, C. I., Barragán-Quijano, E. & Monje-Andrade, B. (2019). Populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) cause significant damage to genetically modified corn crops. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *72*(3), 8953–8962. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.75730

Jaramillo-Cardona, S. (2019). *Efecto de la transformación de sistemas productivos de arroz de secano a riego mediante la cosecha de agua lluvia y del manejo agronómico sostenible sobre los rendimientos del cultivo en dos localidades de Nicaragua* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. Repositorio UMANIZALES. https://ridum.umanizales.edu.co/items/02039e15-2778-414e-850f-04cc6a63da15

Jones, J. W., Hoogenboom, C., Snyder, G. H., Williams, J. R., Aboujaoudé, J. H. E., & de Jong, W. J. S. (2002). Modeling the interaction between crop growth and water supply. *Agricultural Water Management*, *56*(3), 173–185.

Kaune, A., Werner, M., Rodríguez, E., Karimi, P., & De Fraiture, C. (2017). A novel tool to assess available hydrological information and the occurrence of sub-optimal water allocation decisions in large irrigation districts. *Agricultural Water Management*, *191*, 229–238. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.013

Klaubauf, S., Tharreau, D., Fournier, E., Groenewald, J. Z., Crous, P. W., De Vries, R. P., & Lebrun, M. H. (2014). Resolving the polyphyletic nature of *Pyricularia* (*Pyriculariaceae*). *Studies in Mycology*, *79*(1), 85-120. https://doi.org/10.1016/j.simyco.2014.09.004

Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M. I., & Ahmadikhah, A. (2024). Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, *31*(1), 14-32. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005

Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (2002). Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. Spatial data analysis. *Crop Science*, *42*(3), 804–815. https://doi.org/10.2135/cropsci2002.8040

Kumar, A., Yang, T., & Sharma, M. P. (2019). Greenhouse gas measurement from Chinese freshwater bodies: A review. *Journal of Cleaner Production*, *233*, 368-378. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.052

Kumawat, A., Kumar, D., Shivay, Y., Yadav, D., Sadhukhan, R., Gawdiya, S., Ali, S., Madhu, M., Kumar, K., Rashmi, I., & Jat, R. (2024). Sustainable basmati rice yield and quality enhancement through long-term organic nutrient management in the Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research*, *310*, 109356. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109356

Kung, P., & Atthayodhin, C. (1968). Water requirements in rice production. En Committee for the Coordination of Investigations of the Lower Mekong Basin, *Fourth seminar on economic and social studies (rice production)* (pp. 94–112). Los Baños, Philippines.

Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, *170*, 95–108. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.013

Lang, G. H., Da Silva-Lindemann, I., Goebel, J. T., Ferreira, C. D., Dos Santos-Acunha, T., & De Oliveira, M. (2020). Fluidized-bed drying of black rice grains: Impact on cooking properties, in vitro starch digestibility, and bioaccessibility of phenolic compounds. *Journal of Food Science*, *85*(6), 1717-1724. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15145

Lark, R. M., & Stafford, J. V. (1997). Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Annals of Applied Biology*, *130*(1), 111–121. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7348.1997.tb05787.x

Levintal, E., Kniffin, M. L., Ganot, Y., Marwaha, N., Murphy, N. P., & Dahlke, H. E. (2022). Agricultural managed aquifer recharge (Ag-MAR)—a method for sustainable groundwater management: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(3), 291–314. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2050160

Li, Y., Shi, Z., Li, F., & Li, H. Y. (2007). Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Computers and Electronics in Agriculture*, *56*(2), 174–186. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.013

Li, Y., Shi, Z., Wu, H. X., Li, F., & Li, H. Y. (2013). Definition of management zones for enhancing cultivated land conservation using combined spatial data. *Environmental Management*, *52*(4), 792-806.

Liang, K., Zhong, X., Huang, N., Lampayan, R. M., Pan, J., Tian, K., & Liu, Y. (2016). Grain yield, water productivity and CH_4 emission of irrigated rice in response to water management in south China. *Agricultural Water Management*, *163*, 319–331. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.015

Lin, K., & Wu, J. (2020). Effect of introducing frogs and fish on soil phosphorus availability dynamics and their relationship with rice yield in paddy fields. *Scientific Reports*, *10*(1), 21. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56644-z

Liu, T., Bruins, R. J. F., & Heberling, M. T. (2018). Factors influencing farmers' adoption of best management practices: A review and synthesis. *Sustainability*, *10*(2), 432. https://doi.org/10.3390/su10020432

Lizcano-Toledo, R., Rojas-Pareja, D. G., Osorio-Saravia, J. F., Olivera-Viciedo, D., & Lizcano-Toledo, M. V. (2022). Sistemas de labranza del suelo y su efecto sobre cuatro variedades de algodón en Armero, Colombia. *Investigación Agraria*, *24*(1), 23-30. https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/693

Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Guzmán, P., Amezquita, N., Garcés, G., Puente, O., & Trujillo, C., Chirinda, N., & Pittelkow, C. M. (2024). Evaluating greenhouse gas mitigation through alternate wetting and drying irrigation in Colombian rice production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *360*, 108787. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108787

Machuca-Chávez, P., Colunga-García Marín, P., & Zizumbo-Villarreal, D. (2010). Introducción y difusión temprana de recursos fitogenéticos en la región Balsas-Jalisco durante el siglo XVI: Una perspectiva agrohistórica. *Revista de Geografía Agrícola*, *45*, 77–96. https://www.redalyc.org/pdf/757/75726134006.pdf

Maclean, J., Hardy, B., & Hettel, G. (2013). *Rice Almanac: Source book for one of the most important economic activities on earth*. IRRI; Warda; Centro Internacional de Agricultura Tropical Internacional; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. http://books.irri.org/0851996361_content.pdf

MAGRO S. A. (2023). Semillas híbridas. https://magro.com.co/categoria-productos/semillas/

Malau, L. R. E., Ulya, N. A., Anjani, R., & Rahmat, M. (2021). Study of ENSO impact on agricultural food crops price as basic knowledge to improve community resilience in climate change. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 874, N.º 1, p. 012008). IOP Publishing. http://doi.org/10.1088/1755-1315/874/1/012008

Mariani, R., & D. Remes-Lenicov, A. M. M. (2015). *Tagosodes orizicolus* (Muir, 1926), vector del "virus de la hoja blanca del arroz" (HBV) en la República Argentina (Homoptera-Delphacidae). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, 104*(2), 151-156. http://revista-vieja.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/207/125

Marschner, P. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Elsevier.

Massey, J. H., Reba, M. L., Adviento-Borbe, M. A., Chiu, Y. L., & Payne, G. K. (2022). Direct comparisons of four irrigation systems on a commercial rice farm: Irrigation water use efficiencies and water dynamics. *Agricultural Water Management*, *266*, 107606. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107606

Massey, J. H., Smith, M. C., Vieira, D. A. N., Adviento-Borbe, M. A., Reba, M. L., & Vories, E. D. (2018). Expected irrigation reductions using multiple-inlet rice irrigation under rainfall conditions of the Lower Mississippi River Valley. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, *144*(7), 04018016. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001303

Massey, J. H., Walker, T. W., Anders, M. M., Smith, M. C., & Avila, L. A. (2014). Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. *Agricultural Water Management*, *146*, 297-304. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.023

Medrano-Miranda, A. F., & Contreras-Sánchez, D. F. (2023). *Evaluación de cuatro sistemas de labranza para el cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en el valle medio del Sinú* [Trabajo de grado, Universidad de Córdoba]. Repositorio UNICORDOBA. https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/f7d2855a-5173-4943-801c-1a40d5250f38

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, *2*(2), e1500323. https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1500323

Mendesil, E., Tefera, T., Blanco, C. A., Paula-Moraes, S. V., Huang, F., Viteri, D. M., & Hutchison, W. D. (2023). The invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Africa and Asia: Responding to the food security challenge, with priorities for integrated pest management research. *Journal of Plant Disease Protection*, *130*(6), 1175–1206. https://doi.org/10.1007/s41348-023-00777-x

Meneses, R. (2008). *Manejo integrado de los principales insectos y ácaros plagas del arroz*. Instituto de Investigaciones del Arroz. https://tinyurl.com/5t4jtfxt

Millennium Ecosystem Assessment [MEA]. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment. https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2014). *Plan de Cambio Climático Huila 2050: Preparándose para el cambio climático*. Gobernación del Huila; Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena; Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional; Programa de Carbono Forestal, Mercados y Comunicaciones. https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/aproximacion__al_territorio/PICC_HUILA-ilovepdf-compressed.pdf

Mitra, D., Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., García-Montelongo, A. M., Blanco, E. L., Lopes-Lira, V., Olatunbosun-Adeyemi, N., Khoshru, B., Mondal, R., Chidambaranathan, P., Panneerselvam, P., & Das-Mohapatra, P. K. (2023). Rice (*Oryza sativa* L.) plant protection using dual biological control and plant growth-promoting agents: Current scenarios and future prospects. *Pedosphere*, *33*(2), 268-286. https://www.researchgate.net/publication/355485738_Rice_Oryza_sativa_L_plant_protection_using_dual_biological_control_and_plant_growth-promoting_agents_Current_scenarios_and_future_prospects

Mohidem, N. A., Hashim, N., Shamsudin, R., & Che Man, H. (2022). Rice for food security: Revisiting its production, diversity, rice milling process and nutrient content. *Agriculture*, *12*(6), 741. https://doi.org/10.3390/agriculture12060741

Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, *9*(3), 747–766. https://doi.org/10.2307/2401901

Montenegro-Ramos , O., Jaramillo-Bonilla, S., & Abaunza-González , C. (2023). Láminas de riego y su influencia en el rendimiento de arroz (*Oriza sativa* L.) la variedad Fedearroz-67 en el Valle Cálido del Magdalena. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(4), 5351-5376. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7352

Moreira-Mendoza, D. A. (2018). *Guía para el establecimiento y monitoreo del cultivo de arroz bajo la metodología del SRI*. Confiaf, Fedearroz, IDIAE, IICA, Fontagro, FMAM. https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/2017/07/SRI-Colombia-Guia-para-Establecimiento-y-Monitoreo-del-Cultivo-de-arroz-bajo-SRI-VF-Enero-2018.pdf

Mulla, D. J. (1989). Soil spatial variability and methods of analysis. En C. E. Whitman, J. F. Parr, R. I. Papendick & R. E. Meyer (Eds.), *Soil, water, and crop/livestock management systems for rainfed agriculture in the Near East Region: Proceedings of the workshop at Amman, Jordan, January 18-23, 1986* (pp. 185-204). US Agency for International Development. https://repo.mel.cgiar.org/items/e582980c-c70d-40fb-b548-0272cb0f8e7a

Müller, A., Nunes, M. T., Maldaner, V., Coradi, P. C., Moraes, R. S., Martens, S., Fernandes, A., Fogliato, V., & König, C. (2022). Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality. *Rice Science*, *29*(1), 16-30. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.12.002

Muñoz, M. C. (2008). The effect of temperature and relative humidity on the airborne concentration of "*Pyricularia oryzae*" spores and the development of rice blast in southern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, (1), 61-69. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2551641

Natuhara, Y. (2013). Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan. *Ecological Engineering*, *56*, 97–106. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.026

Navarro, M. A. (2018). Complejo de malezas predominante en áreas de arroz de riego y secano en Panamá. En I. Camargo Buitrago, I. E. Quirós MacIntire & B. Zachrisson Salamina (Comps.), *Innovación tecnológica para el manejo integrado del cultivo de arroz en Panamá*. Idiap. https://tinyurl.com/ypdyh9me

Navas Ríos, G. E. (1998). Avances sobre algunas alternativas de manejo de suelos agrícolas degradados en el Piedemonte Llanero. En G. Romero, D. Aristizábal & C. Jaramillo (Eds.), *Memorias del Encuentro Nacional de Labranza de Conservación* (pp. 408-420). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/15976

Navedo, J. G., Hahn, S., Parejo, M., Abad-Gómez, J. M., Gutiérrez, J. S., Villegas, A., Sánchez-Guzmán, J. M., & Masero, J. A. (2015). Unravelling trophic subsidies of agroecosystems for biodiversity conservation: Food consumption and nutrient recycling by waterbirds in Mediterranean rice fields. *Science of The Total Environment*, *511*, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.068

Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. *Advances in Agronomy*, *143*, 175–245. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003

Norzagaray-Campos, M. N., García-Gutiérrez, Llanes-Cárdenas, O., Troyo-Diéguez, E., & Muñoz-Sevilla, P. (2010). Análisis de la producción agrícola extensiva en Sinaloa: Alternativas para el uso sostenible del agua. *Ra Ximhai*, *6*(1), 45–50. https://doi.org/10.35197/rx.06.01.2010.06.mn

Novelli, D., & Campora, M. C. (2015). Malezas, la expresión de un sistema: El manejo de las malezas necesita un abordaje integral y de largo plazo que contribuya a la sustentabilidad de los agroecosistemas: El monitoreo, la rotación y el uso racional de los herbicidas son algunas de las prácticas clave para integrar. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *41*(3), 241-247.

Ogoshi, A. (1996). Introduction — The Genus *Rhizoctonia*. En B. Sneh, S. Jabaji-Hare, S. Neate & G. Dijst (Eds.), *Rhizoctonia species: Taxonomy, molecular biology, ecology, pathology and disease control* (pp. 1-9). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2901-7_1

Ohana-Levi, N., Bahat, I., Peeters, A., Shtein, A., Netzer, Y., Cohen, Y., & Ben-Gal, A. (2019). A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*, 719–731. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.012

Okada, K., & López-Galvis, L. (2018). Improving resource utilization efficiency in rice production systems with contour-levee irrigation in Colombia. En M. Kokubun & S. Asanuma (Eds.), *Crop production under stressful conditions* (pp. 71-86). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7308-3_5

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], & Food and Agriculture Organization [FAO] (2023). OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/08801ab7-en.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1999). *Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas*. http://ftp.fao.org/agl/agll/docs/gepnms.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2004). El arroz y la nutrición humana. https://www.fao.org/4/y4875s/y4875s02.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). *Water use in agriculture*. Food and Agriculture Organization.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). Crops and livestock products [Base de datos]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2024). Production/Yield quantities of rice, paddy in world + (Total) [Base de datos]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize

Ortega, D. F. (1987). Sistema de evaluación de la fertilidad del suelo. *Suelos Ecuatoriales*, *12*(2), 281-286.

Ortega, D. F. (1994). *Consideraciones generales para interpretar análisis químicos de suelos*. IGAC.

Orús, A. (2024, 30 de septiembre). Evolución del consumo global de arroz 2008-2024. *Statista*. https://es.statista.com/estadisticas/598941/consumo-total-de-arroz-en-el-mundo-2008/

Orzolek, M. (Ed.). (2017). *A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780081021705/a-guide-to-the-manufacture-performance-and-potential-of-plastics-in-agriculture

Ospina-Gómez, J. O., Amézquita Varón, N. F., Sierra-Daza, J. J., García-Baquero, E., Ramírez-Villalba, J. C., Toro-Sánchez, S., & Castro-Neira, J. R. (2024). *Guía de manejo de variedades de arroz*. Fedearroz.

Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Chaali, N., Quevedo, Y. M., Calderón, J. E., & Montenegro, O. (2022). Towards site specific management zones delineation in rotational cropping system: Application of multivariate spatial clustering model based on soil properties. *Geoderma Regional*, *30*, e00564. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00564

Pabón, H. A. (1988). *Las malezas y su manejo en arroz*. AGROSAVIA. http://hdl.handle.net/20.500.12324/30515

Paccioretti, P., Córdoba, M., & Balzarini, M. (2020). FastMapping: Software to create field maps and identify management zones in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *175*, 105556. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105556

Pantoja, A., Matta, J., & Correa, F. (1994). Stem borer, Rupela albinella (Cramer), and stem rot, Sclerotium oryzae, in southwestern Colombia rice field. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, *78*(1-2), 17-22. https://doi.org/10.46429/jaupr.v78i1-2.4249

Pantoja-Benavides, A. D., Garcés-Varon, G., & Restrepo-Díaz, H. (2021). Foliar growth regulator sprays induced tolerance to combined heat stress by enhancing physiological and biochemical responses in rice. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 702892. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.702892

Pardey-R., C., Cuevas-Pérez, F., Baena, D., & Martínez, C. P. (1996). Characterization of the resistance to mechanical damage by *Tagosodes orizicolus* (Muir) (Homoptera:Delphacidae) in twelve rice cultivars (*Oryza sativa*). *Revista Colombiana de Entomología*, *22*(1), 37–43. https://doi.org/10.25100/socolen.v22i1.9920

Paredes-Sánchez, F. A., Rivera, G., Bocanegra-García, V., Martínez-Padrón, H. Y., Berrones-Morales, M., Niño-García, N., & Herrera-Mayorga, V. (2021). Advances in control strategies against *Spodoptera frugiperda*: A review. *Molecules*, *26*(18), 5587. https://doi.org/10.3390/molecules26185587

Peixoto, C. N., Ottoni, G., Filippi, M. C., Silva-Lobo, V. L., & Prabhu, A. S. (2013). Biology of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* isolates from rice and grasses and epidemiological aspects of crown sheath rot of rice. *Tropical Plant Pathology*, *38*, 495-504. https://doi.org/10.1590/S1982-56762013000600005

Pellerin, K. J., Webster, E. P., Zhang, W., & Blouin, D. C. (2004). Potential use of imazethapyr mixtures in drill-seeded imidazolinone-resistant rice. *Weed technology*, *18*(4), 1037-1042.

Pereyra, F., & Cambra, M. (2018). Obtención y caracterización de almidón químicamente modificado de arroz. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1–12.

Pérez-Lotz, J. (2016). *Análisis genético de la resistencia parcial a Magnaporthe oryzae en arroz (Oryza sativa) en varias poblaciones y ambientes* [Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de València]. Repositorio UPV. https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/62582

Phillips, J., Durand-Morat, A., Nalley, L. L., Graterol, E., Bonatti, M., Loaiza, K., Urioste, S., & Yang, W. (2024). Understanding demand for broken rice and its potential food security implications in Colombia. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, 100884. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100884

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, *7*(1), 217-240. https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021

Preciado, Cuevas, A., & Acero, C. (2018). *Las cosechadoras para el cultivo de arroz. Características y calibración*. Fedearroz. https://fedearroz-website.s3.amazonaws.com/media/documents/cosechadoras_cultivo_arroz_H6bqo8C.pdf

Price, A. H., Norton, G. J., Salt, D. E., Ebenhoeh, O., Meharg, A. A., Meharg, C., Islam, M. R., Sarma, R. N., Dasgupta, T., Ismail, A. M., McNally, K. L., Zhang, H., Dodd, I. C., & Davies, W. J. (2013). Alternate wetting and drying irrigation for rice in Bangladesh: Is it sustainable and has plant breeding something to offer? *Food and Energy Security*, *2*(2), 120-129. https://doi.org/10.1002/fes3.29

Propper, C. R., Sedlock, J. L., Smedley, R. E., Frith, O., Shuman-Goodier, M. E., Grajal-Puche, A., Stuart, A. M., & Singleton, G. R. (2023). Balancing food security, vertebrate biodiversity, and healthy rice agroecosystems in Southeast Asia. *Crop And Environment*, *3*(1), 43-50. https://doi.org/10.1016/j.crope.2023.11.005

Proyecto de Modernización de los Servicios de Tecnología Agrícola [Promosta]. (2005). *Guías tecnológicas de frutas y vegetales: El cultivo de la yuca*. Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria.

Purseglove, J. W. (1985). *Tropical crops: Monocotyledons*. Longman Group Limited. https://archive.org/details/tropicalcropsmon0002purs/page/n7/mode/2up?view=theater

Quevedo-Amaya, Y. M., Beltrán-Medina, J. I., & Barragán-Quijano, E. (2019). Identification of climatic and physiological variables associated with rice (*Oryza sativa* L.) yield under tropical conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *72*(1), 8699–8706. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n1.72076

Quintero-Calderón, E. H., Sánchez-Reinoso, A. D., Chávez-Arias, C. C., Garces-Varón, G., & Restrepo-Diaz, H. (2021). Rice seedlings showed a higher heat tolerance through the foliar application of biostimulants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *49*(1), 12120-12120.

Quispe, S. M., Muñoz, O., Velázquez, M., & Martínez, G. (1994). Selección de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo el sistema de riego sequía. *Agrociencia*, *Serie Fitociencia*, *5*(2), 75-90.

Rajendran, S., Park, H., Kim, J., Park, S. J., Shin, D., Lee, J., Song, Y. H., Paek, N., & Kim, C. M. (2024). Methane emission from rice fields: Necessity for molecular approach for mitigation. *Rice Science*, *31*(2), 159–178. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.10.003

Ramírez S., J., Hoyos C., V., & Plaza T., G. (2015). Phytosociology of weeds associated with rice crops in the department of Tolima, Colombia. *Agronomía Colombiana*, *33*(1), 64-73.

Ramírez, J. (2014). *Dinámica poblacional de malezas del cultivo de arroz en las zonas centro, meseta y norte del departamento del Tolima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50430

Rang, Z. W., Jagadish, S. V. K., Zhou, Q. M., Craufurd, P. Q., & Heuer, S. (2011). Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. *Environmental and Experimental Botany*, *70*(1), 58–65. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.08.009

Rathnayake, H. A., Navaratne, S., & Navaratne, C. (2022). Effect of process variables on rice flour functional properties, and porous structure of rice and wheat-based leavened food products. *Food Technology and Biotechnology*, *60*(1), 99-108. https://doi.org/10.17113/ftb.60.01.22.7238

Rejesus, R. M., Palis, F. G., Rodríguez, D. G. P., Lampayan, R. M., & Bouman, B. A. (2011). Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy*, *36*(2), 280–288. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.026

Restrepo-Díaz, H., & Garces-Varón, G. A. (2013). Response of rice plants to heat stress during initiation of panicle primordia or grain-filling phases. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *9*(3), 318-325.

Rezvi, H. U. A., Tahjib-Ul-Arif, M., Azim, M. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M. H., Najnine, F., Dawood, M. F. A., Skalicky, M., & Brestič, M. (2023). Rice and food security: Climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food and Energy Security*, *12*(1), e430. https://doi.org/10.1002/fes3.430

Ribeiro, V. J., Andrade, F. V., Passos, R. R., Mendonça, E. S., Da Silva, L. L., & Sartori, A. F. (2016). Slow-release stabilized nitrogen fertilizers on initial development and nutrition of coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Australian Journal of Crop Science*, *10*(4), 497-502. https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.04.p7229x

Rodríguez, D. P. (2024). La rotación del cultivo del arroz con el del algodón hace la tierra 20 % más productiva. Agronegocios. https://www.agronegocios.co/agricultura/la-rotacion-del-cultivo-del-arroz-con-el-del-algodon-hace-la-tierra-20-mas-productiva-3828953

Rosales, R., & De la Garza, C. M. (2006). *Control químico de maleza en maíz en la zona central de Tamaulipas*. Inifap.

Roychoudhury, A. (Ed.). (2020). *Rice research for quality improvement: Genomics and genetic engineering*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-4120-9

Ryan, E. P. (2011). Bioactive food components and health properties of rice bran. *Journal of American Veterinary Medical Association*, *285*(5), 593-600. https://doi.org/10.2460/javma.238.5.593

Saboya Arevalo, J. (2021). Incidencia de los fertilizantes del cultivo de arroz en la calidad del agua de la quebrada Shatona del Distrito de Jepelacio-2019 [Tesis de pregrado, Universidad de San Martín]. Repositorio UNSM. https://repositorio.unsm.edu.pe/item/5f104d76-600c-4437-be69-8b6f8ca474df

Salamanca-Jiménez, A., Doane, T. A., & Horwath, W. R. (2017). Nitrogen use efficiency of coffee at the vegetative stage as influenced by fertilizer application method. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 223. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00223

Sánchez-Reinoso, A. D., Garcés-Varon, G., & Restrepo-Díaz, H. (2013). Biochemical and physiological characterization of three rice cultivars under different daytime temperature conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *74*(4), 373–379. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392014000400001

Sánchez-Reinoso, A. D., Nieto, M. F., Dossmann, J., Camacho-Tamayo, J. H., & Restrepo-Díaz, H. (2019). Nutrient uptake, partitioning, and removal in two modern high-yielding Colombian rice genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(18), 2373-2387

Sangha, L., Lamba, J., Kumar, H., Srivastava, P., Dougherty, M., & Prasad, R. (2020). An innovative approach to rainwater harvesting for irrigation based on El Niño Southern Oscillation forecasts. *Journal of Soil and Water Conservation*, *75*(5), 565–578. https://doi.org/10.2489/jswc.2020.00085

Sarkar, S. C., & Gupta, P. K. S. (2002). Some soil factors influencing incidence of sheath blight of rice caused by *Rhizoctonia solani* (Kühn). *Annals of Plant Protection Sciences*, *10*(2), 299–301. https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:apps&volume=10&issue=2&article=029

Sayler, R., Cartwright, R., & Yang, Y. (2006). Genetic characterization and Real Time PCR detection of *Burkholderia glumae*, a newly emerging bacterial pathogen of rice in the United States. *Plant Disease*, *90*(5), 603-610. https://doi.org/10.1094/PD-90-0603

Schenatto, K., Souza, E. G. de, Bazzi, C. L., Betzek, N. M., Gavioli, A., & Beneduzzi, H. M. (2017). Use of the farmer's experience variable in the generation of management zones. *Semina: Ciências Agrárias*, *38*(4Supl1), 2305–2322. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4Supl1p2305

Scott, R. C. (2012). *Recommended chemicals for weed and brush control*. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, US Department of Agriculture, and County Governments Cooperating.

Scudiero, E., Teatini, P., Manoli, G., Braga, F., Skaggs, T. H., & Morari, F. (2018). Workflow to establish time-specific zones in precision agriculture by spatiotemporal integration of plant and soil sensing data. *Agronomy*, *8*(11), 253. https://doi.org/10.3390/agronomy8110253

Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG]. (2003). *Manual técnico para el cultivo de arroz*. SAG. http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/handle/123456789/650?show=full

Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG]. (2006). *Métodos de siembra en arroz* [Serie Arroz, N.º 10]. SAG. https://dicta.gob.hn/files/2006,-Metodos-de-siembra-en-arroz,-F.pdf

Semillas de Arroz Pajonales. (2024). Semillas de arroz pajonales: La mejor elección para tu cultivo. https://www.pajonales.com/semillas-de-arroz-pajonales-la-mejor-eleccion-para-tu-cultivo/

Shaner, D. L. (2017). Physiological effects of the imidazolinone herbicides. En D. Shaner, & S. O'Connor (Eds.), *The imidazolinone herbicides (1991)* (pp. 129-138). CRC press.

Shaner, D. L., Anderson, P. C., & Stidham, M. A. (1984). Imidazolinones: Potent inhibitors of acetohydroxyacid synthase. *Plant Physiology*, *76*(2), 545-546.

Siebenmorgen, T., Bautista, R., & Counce, P. (2007). Optimal harvest moisture contents for maximizing milling quality of long- and medium-grain rice cultivars. *Applied Engineering in Agriculture*, 23. https://doi.org/10.13031/2013.23476

Singh, O., Bathula, J., & Singh, D. K. (2019). Rice blast modeling and forecasting. *International Journal of Chemical Studies*, *7*(6), 2788–2799. https://www.chemijournal.com/archives/2019/vol7issue6/PartAS/7-6-253-505.pdf

Singh, P., Mazumdar, P., Harikrishna, J. A., & Babu, S. (2019). Sheath blight of rice: A review and identification of priorities for future research. *Planta*, 250, 1387–1407. https://doi.org/10.1007/s00425-019-03246-8

Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, *12*, 440. https://doi.org/10.3390/insects12050440

Srinivasan, A. (2006). *Handbook of precision agriculture: Principles and applications*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781482277968

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop: The FAO Crop Model to simulate yield response to water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, *101*, 426-437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

Sudeepthi, K., Jyothula, D. P. B., Umar, S., Kumar, B., & Thati, S. (2020). Assessment of genetic variability, character association and path analysis for yield and yield component traits in rice (Oryza sativa L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, *11*(1), 144-148. https://doi.org/10.37992/2020.1101.026

Sudianto, E., Beng-Kah, S., Ting-Xiang, N., Saldain, N. E., Scott, R. C., & Burgos, N. R. (2013). Clearfield® rice: Its development, success, and key challenges on a global perspective. *Crop Protection*, *49*, 40-51.

Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M., & Subramoniam, S. R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, *309*, 127272. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127272

Suzuki, F., Sawada, H., Azegami, K., & Tsuchiya, K. (2004). Molecular characterization of the tox operon involved in toxoflavin biosynthesis of *Burkholderia glumae*. *Journal of General Plant Pathology*, *70*, 97-107. https://doi.org/10.1007/s10327-003-0096-1

Tagliapietra, B. R., Soares, C. F., & Clerici, M. (2024). Arroz (*Oryza sativa* L.) y sus productos para consumo humano: Características generales, propiedades nutricionales y tipos de procesamiento. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, *44*, e00292. https://doi.org/10.5327/fst.00292

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6th Ed.). Artmed Editora.

Takashi, N., & Tadao, U. (1978). Ecological and morphological characteristics of the sclerotia of *Rhizoctonia solani* Kühn produced in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *10*(6), 471-478. https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90039-1

Tascón, E., & García, D. (1985). *Arroz: Investigación y producción*. PNUD; CIAT. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/SB191.R5_A7_C3_Arroz_Investigaci%C3%B3n_y_producci%C3%B3n_Referencia_de_los_cursos_de_capacitaci%C3%B3n_sobre_ar.pdf

Tay, W. T., Meagher, R. L., Czepak, C., & Groot, A. T. (2023). *Spodoptera frugiperda*: Ecology, evolution, and management options of an invasive species. *Annual Review of Entomology*, *68*(1), 299-317. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120220-102548

Teasdale, J. R. (2004). *Principios y prácticas para el uso de cultivos de cobertura en el manejo de sistemas de malezas*. FAO. https://www.fao.org/4/y5031s/y5031s0d.htm

Tekken, V., Spangenberg, J. H., Burkhard, B., Escalada, M., Stoll-Kleemann, S., Truong, D. T., & Settele, J. (2017). "Things are different now": Farmer perceptions of cultural ecosystem services of traditional rice landscapes in Vietnam and the Philippines. *Ecosystem Services*, *25*, 153–166. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.010

Tinoco, R., & Acuña, A. (2009). *Manual de recomendaciones técnicas: Cultivo de arroz (Oryza sativa)*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria. https://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2018/Cultivo_de_arroz_Tinoco_2009_min_edited.pdf

Tivet, F., & Boulakia, S. (2017). *Climate smart rice cropping systems in Vietnam: State of knowledge and prospects*. CIRAD. https://agritrop.cirad.fr/586964/1/2017-06+CS+rice+Vietnam+final.pdf

Torres-León, J. L., Cortés-Gómez, C., Arias, N., Zabala, A., Quintero, J. L., Beltrán, J. A., & Rodríguez, H. (2020). Recomendaciones para el sector palmicultor ante la segunda temporada de lluvias y evolución del fenómeno de La Niña. *Boletín El Palmicultor*, *584*(Octubre), 23–25. https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141110

Toufiq, M. (2004). Yield and biomass in rice interactions of nitrogen, phosphorous and water application. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *7*(12), 2115–2120. http://doi.org/10.3923/pjbs.2004.2115.2120

Tsror, L. (2010). Biology, epidemiology and management of *Rhizoctonia solani* on potato. *Journal of Phytopathology*, *158*(10), 649-658. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2010.01671.x

Tuihedur Rahman, H. M., Hickey, G. M., Ford, J. D., & Egan, M. A. (2018). Climate change research in Bangladesh: Research gaps and implications for adaptation-related decision-making. *Regional Environmental Change*, *18*, 1535–1553. https://doi.org/10.1007/s10113-017-1271-9

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2013). *Consolidación de la metodología general de evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional*. Imprenta Nacional.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2023). Resultados Evaluaciones Agropecuarias 2023. https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/Resultados%20Evaluaciones%20Agropecuarias%202023.pdf

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World population prospects 2022: Data sources* [UN DESA/POP/2022/DC/NO. 9]. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2022_wpp-data_sources.pdf

Vallejos Espinoza, C. F. (2018). *Identificación y comparación de malezas presentes en paños para cultivo de arroz (Oryza sativa L.) bajo siembra inundada y directa, en Unicaven, Parral* [Tesis doctoral, Universidad de Talca (Chile)]. Repositorio Institucional. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4432517

Vásquez, V. S., Vásquez, G. E. G., Piedrahíta, D. C., Lerner, S. H., Espinoza, F. E., & Valarezo-Beltron, O. (2020). Control químico de malezas en fincas de arroz (*Oryza sativa* L.), en el sistema de riego y drenaje Babahoyo, Ecuador. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, *5*(2), 66-79.

Vasyl, C. (2024). *Cultivos de cobertura: tipos y beneficios*. Eos Data Analytics. https://eos.com/es/blog/cultivos-de-cobertura/

Vélez Vargas, L. D. (1995). La rotación de cultivos: Una alternativa económica y ecológica para la producción agrícola en Colombia. *Bol. Tec. Fac. Ccias. Agrop.*, *4*, 3–10. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59194

Vidhyasekaran, P., Rabindran, R., Muthamilan, M., Nayar, K., Rajappan, K., Subramanian, N., & Vasumathi, K. (1997). Development of a powder formulation of *Pseudomonas fluorescens* for control of rice blast. *Plant Pathology*, *46*(3), 291–297. https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1997.d01-27.x

Villena, M. (2022). *Fertilización sostenible y gestión integral de nutrientes*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias - Odepa. https://tinyurl.com/2uyrwbn3

Vories, E., Tacker, P. L., & Hogan, R. (2005). Multiple inlet approach to reduce water requirements for rice production. *Applied Engineering in Agriculture*, *21*(4), 611–616. https://doi.org/10.13031/2013.18571

Vurukonda, S. S. K. P., Giovanadri, D., & Stefani, E. (2021). Growth promotion and biocontrol activity of endophytic *Streptomyces* spp. En L. Giampietro (Ed.), *Prime archives in molecular sciences* (2.ª ed.; pp. 1–55). Vide Leaf. https://videleaf.com/growth-promotion-and-biocontrol-activity-of-endophytic-streptomyces-spp/

White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, *105*, 1073-1080. https://doi.org/10.1093/aob/mcq085

Willocquet, L., Noel, M., Sackville-Hamilton, R., & Savary, S. (2012). Susceptibility of rice to sheath blight: An assessment of the diversity of rice germplasm according to genetic groups and morphological traits. *Euphytica*, *183*, 227–241. https://doi.org/10.1007/s10681-011-0451-9

Wilson, R. A., & Talbot, N. J. (2009). Under pressure: Investigating the biology of plant infection by *Magnaporthe oryzae*. *Nature Reviews Microbiology*, *7*(3), 185–195. https://doi.org/10.1038/nrmicro2032

Wu, J., Qi, Y., Hu, G., Li, J., Li, Z., & Zhang, H. (2017). Genetic architecture of flag leaf length and width in rice (Oryza sativa L.) revealed by association mapping. *Genes & Genomics*, *39*(3), 341-352.

Xiang, L. I., Yu-chun, P. A. N., Zhong-qiang, G. E., & Chun-jiang, Z. H. A. O. (2007). Delineation and scale effect of precision agriculture management zones using yield monitor data over four years. *Agricultural Sciences in China*, *6*(2), 180–188. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(07)60033-9

Xu, Q., Liu, T., Guo, H., Dou, Z., Gao, H., & Zhang, H. (2021). Conversion from rice–wheat rotation to rice–crayfish coculture increases net ecosystem service values in Hung-tse Lake area, east China. *Journal of Cleaner Production*, *319*, 128883. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128883

Yang, X. (2004). Identification of bacterial pathogens causing panicle blight of rice in Louisiana [Tesis de maestría, Lousiana State University y Agricultural and Mechanical College]. Repositorio ISU. http://doi.org/10.31390/gradschool_theses.2883

Zachrisson, B. (2005). Manejo de la población de *Tagosodes orizicolus* (Muir) (Homoptera: Delphacidae), vectora del virus de la hoja blanca del arroz VHBA, por medio de productos de origen orgánico y alomonas. *Tecnociencia*, *7*(2), 57-68. https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/768

Zachrisson, B., Polanco, P., & Martínez, O. (2014). Biological and reproductive performance of *Oebalus insularis* Stal (*Hemiptera*: Pentatomidae) on different host plants. *Revista de Protección Vegetal*, *29*(2), 77-81. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522014000200001&lng=es&tlng=es

Zachrisson, B., Santana, A., & Gupta, M. (2019). Effects of essential oils from two species of *Piperaceae* on parasitized and unparasitized eggs of *Oebalus insularis* (Heteroptera: Pentatomidae) by *Telenomus podisi* (Hymenoptera: Platygastridae). *Natural Product Communications*, *14*(1). https://doi.org/10.1177/1934578X1901400122

Zambrano-Mero, J. D., Navia-Santillán, D. F., Castillo-Carrillo, C. I., Delgado-Párraga, A. G., & Celi-Herán, R. (2024). Ciclo biológico y desempeño reproductivo del chinche vaneador del arroz (*Oebalus insularis* Stal.) en cuatro especies hospedantes. *Siembra*, *11*(2), e5983-e5983. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9843256

Zhang, X. Y., Huo, H. L., Xi, X. M., Liu, L. L., Yu, Z., & Hao, J. J. (2016). Histological observation of potato in response to *Rhizoctonia solani* infection. *European Journal of Plant Pathology*, *145*, 289-303. https://doi.org/10.1007/s10658-015-0842-1

Zhao, M., Lin, Y., & Chen, H. (2020). Improving nutritional quality of rice for human health. *Theoretical and Applied Genetics*, *133*, 1397–1413. https://doi.org/10.1007/s00122-019-03530-x

Zhou, X.G., McClung, A.M., Way, M.O., Jo, Y., Tabien, R.E., & Wilson, L.T. (2011). Severe outbreak of bacterial panicle blight across Texas Rice Belt in 2010 [abstract]. *Phytopathology*, *101*, S205



Autoría

Sofiane Ouazaa

Correo: souazaa@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5301-4639
Ingeniero en ciencias del agua de la Universidad de Medjez el Bab (Túnez). MSc en Gestion Integrada del Recurso Agua y Suelo del Instituto Agronómico Mediterráneo de Bari (Italia). MSc en Ciencia e Ingeniería Agraria de la Universidad de Castilla La Mancha (España) y doctor en Ciencias Agrarias con énfasis en Modelamiento y Riego de Precisión de la Universidad de Zaragoza (España).

Alefsi David Sánchez-Reinoso

Correo: adsanchez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8769-3011
Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá). MSc en Ciencias Agrarias – línea de investigación en Fisiología de Cultivos de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y doctor en Ciencias Agrarias – línea de investigación en Fisiología Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá).

Nesrine Chaali

Correo: nchaali@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7007-7079
Ingeniera hidráulica de la Universidad de Medjez el Bab (Túnez). MSc en Land and Water Resources Management del IAMB (Italia) y doctora en Física de Suelos con énfasis en Geofísica de la Universidad de la Basilicata (Italia) y la Universidad de Western Australia (UWA).

Camilo Ignacio Jaramillo-Barrios

Correo: cijaramillo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8302-2736
Ingeniero agrónomo de la Universidad de Cundinamarca, con estudios de especialización en Estadística Aplicada de la Fundación Universitaria Los Libertadores y maestría en Estadística Aplicada de la Universidad Santo Tomás (sede Bogotá).

Sonia Mercedes Polo-Murcia

Correo: spolo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9362-4717
Ingeniera química de la Universidad de América y MSc en Economía de la Universidad de los Andes.

José Isidro Beltrán-Medina

Correo: jibeltran@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3395-4877
Ingeniero agrónomo de la Universidad del Tolima, con estudios de maestría en Fisiología Vegetal de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (sede Tunja, Boyacá).

Kelly Johana Pedroza-Berrío

Correo: kpedroza@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5342-5868
Ingeniera agroindustrial y MSc en Ciencia y Tecnología Agroindustrial de la Universidad del Tolima.

Ángela María Vargas-Berdugo

Correo: avargas@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-0671-3055
Microbióloga de la Universidad de los Andes, con estudios de maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitopatología de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá).

Carlos Alberto Abaunza-González

Correo: cabaunza@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4496-1455
Agrólogo de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, con estudio de maestría en Agroecología y Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible.

John Edinson Calderón-Carvajal

Correo: jecalderon@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2702-7978
Ingeniero agrónomo de la Universidad del Tolima (Ibagué).

Juan Felipe Vélez-González

Correo: jvelez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0009-0000-7202-1394
Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá).

Kemis Lisset Sierra-Martínez

Correo: ksierra@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4434-3027
Ingeniera agrónoma de la Universidad de Córdoba, con estudio de maestría en Gestión de la Innovación.



Modelo productivo para el cultivo de arroz en el valle cálido del Alto Magdalena, Colombia se terminó de editar
en el mes de agosto de 2025,
en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Este libro presenta un modelo productivo para el cultivo de arroz en el Valle Cálido del Alto Magdalena (VCAM), basado en una estrategia integral de manejo agronómico adaptada a las condiciones edafoclimáticas de la región. A partir de un diagnóstico detallado de la variabilidad ambiental y de la evaluación de prácticas de manejo ecoeficientes, se propone un marco orientado a maximizar la productividad del cultivo, garantizando al mismo tiempo la conservación de los recursos hídricos y la estabilidad funcional de los agroecosistemas.

El modelo se estructura en tres componentes fundamentales. El primero corresponde a la gestión eficiente del riego, en la que, frente a escenarios de sequía prolongada y variabilidad climática intra- e interanual, se promueve la implementación de tecnologías de agricultura de precisión y modelos de simulación de programación de riego. Estas herramientas permiten ajustar la oferta hídrica a los requerimientos del cultivo y a las condiciones locales, lo que contribuye a la reducción de la huella hídrica y al incremento de la eficiencia en el uso del agua.

El segundo componente está orientado a la innovación agronómica, que incluye la selección de genotipos adaptados a las condiciones agroclimáticas del VCAM, el manejo integrado de suelos y agua, el control fitosanitario mediante estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE), y la implementación de esquemas de nutrición balanceada y rotación de cultivos (arroz-maíz-algodón) como mecanismo para preservar la fertilidad edáfica y mitigar procesos de degradación del suelo.

El tercer componente corresponde a la sostenibilidad ambiental y social, que enfatiza la valoración de los servicios ecosistémicos, la conservación de la biodiversidad funcional y el fortalecimiento de economías rurales diversificadas como elemento clave para la resiliencia de los sistemas productivos y la seguridad alimentaria regional.

En su conjunto, el modelo constituye una propuesta orientada hacia una agricultura tecnológicamente eficiente, ambientalmente sostenible y socialmente inclusiva, alineada con los retos de adaptación al cambio climático y con los principios de responsabilidad socioambiental. Asimismo, representa un insumo técnico-científico de utilidad para investigadores, extensionistas, agricultores y tomadores de decisión, interesados en consolidar un sistema arrocero más competitivo y resiliente en el VCAM.

AGROSAVIA
EDITORIAL