



Efectos de la humedad del suelo, sistemas de labranza y fertilización nitrogenada sobre el arroz

Effects of soil moisture, tillage systems and nitrogen fertilization on rice

Efeitos da umidade do solo, sistemas de cultivo e fertilização nitrogenada no arroz

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i27.414>

Kentaro Tomita
ktomita@espol.edu.ec

Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). Divisa, Panamá

Artículo recibido: 3 de julio 2025 / Arbitrado: 26 de agosto 2025 / Publicado: 10 de septiembre 2025

RESUMEN

La productividad del cultivo de arroz está fuertemente influenciada por las condiciones edáficas y las prácticas agronómicas aplicadas. El objetivo del estudio es evaluar el efecto de tres tipos de suelo (seco, medio húmedo y alto húmedo), dos sistemas de labranza (cero y convencional) y cuatro niveles de fertilización nitrogenada (0, 30, 60 y 100 kg N ha⁻¹) sobre el rendimiento del arroz de secano (*Oryza sativa* L.) en los Llanos de Coclé, Panamá. Metodología: Se realizó un estudio experimental de campo con enfoque cuantitativo, empleando un diseño factorial 3 × 2 × 4 en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, utilizando la variedad IDIAP 145-05 durante tres años (2007-2009). Los parámetros evaluados incluyeron rendimiento de grano, absorción de nutrientes y propiedades físico-químicas del suelo. Los hallazgos indican que el rendimiento máximo (3,493 ± 156 kg/ha) se obtuvo en suelo alto húmedo con 100 kg N ha⁻¹ bajo labranza convencional. La respuesta cuadrática del rendimiento a la fertilización nitrogenada mostró incrementos significativos hasta 100 kg N ha⁻¹. Los sistemas de labranza mostraron efectos diferenciales según el tipo de suelo: cero labranza fue superior en suelo seco, mientras labranza convencional superó en suelos húmedos. Las conclusiones señalan que es recomendable una dosis de 100 kg N ha⁻¹ para maximizar rendimiento en suelos húmedos y 60 kg N ha⁻¹ para optimizar rentabilidad. La selección del sistema de labranza debe basarse en las condiciones de humedad del suelo para optimizar el uso de nutrientes y el rendimiento del cultivo.

Palabras clave: Arroz de secano; Fertilización nitrogenada; Humedad del suelo; Llanos de Coclé; Sistemas de labranza

ABSTRACT

Rice crop productivity is strongly influenced by soil conditions and agronomic practices. The objective of this study was to evaluate the effect of three soil types (dry, medium-humid, and high-humid), two tillage systems (zero and conventional), and four levels of nitrogen fertilization (0, 30, 60, and 100 kg N ha⁻¹) on the yield of upland rice (*Oryza sativa* L.) in the Llanos de Coclé, Panama. Methodology: A quantitative field experimental study was conducted using a 3 × 2 × 4 factorial design in randomized complete blocks with four replications, using the IDIAP 145-05 variety for three years (2007–2009). The parameters evaluated included grain yield, nutrient uptake, and soil physicochemical properties. The findings indicate that the maximum yield (3,493 ± 156 kg/ha) was obtained in moist upland soils with 100 kg N ha⁻¹ under conventional tillage. The quadratic yield response to nitrogen fertilization showed significant increases up to 100 kg N ha⁻¹. Tillage systems exhibited differential effects depending on soil type: zero tillage was superior in dry soils, while conventional tillage was superior in moist soils. The conclusions indicate that a dosage of 100 kg N ha⁻¹ is recommended to maximize yield in moist soils and 60 kg N ha⁻¹ to optimize profitability. Tillage system selection should be based on soil moisture conditions to optimize nutrient use and crop yield.

Key words: Rainfed rice; Nitrogen fertilization; Soil moisture; Llanos de Coclé; Tillage systems

RESUMO

A produtividade da cultura do arroz é fortemente influenciada pelas condições do solo e pelas práticas agronômicas. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de três tipos de solo (seco, médio-úmido e muito úmido), dois sistemas de preparo do solo (plantio direto e convencional) e quatro níveis de adubação nitrogenada (0, 30, 60 e 100 kg N ha⁻¹) na produtividade do arroz de terras altas (*Oryza sativa* L.) nos Llanos de Coclé, Panamá. Metodologia: Um estudo experimental quantitativo de campo foi conduzido utilizando um delineamento fatorial 3 × 2 × 4 em blocos casualizados completos com quatro repetições, utilizando a variedade IDIAP 145-05 durante três anos (2007–2009). Os parâmetros avaliados incluíram produtividade de grãos, absorção de nutrientes e propriedades físico-químicas do solo. Os resultados indicam que a produtividade máxima (3.493 ± 156 kg/ha) foi obtida em solos úmidos de terras altas com 100 kg N ha⁻¹ sob preparo convencional do solo. A resposta quadrática da produtividade à adubação nitrogenada mostrou aumentos significativos até 100 kg N ha⁻¹. Os sistemas de preparo do solo apresentaram efeitos diferenciais dependendo do tipo de solo: o plantio direto foi superior em solos secos, enquanto o preparo convencional foi superior em solos úmidos. As conclusões indicam que uma dosagem de 100 kg N ha⁻¹ é recomendada para maximizar a produtividade em solos úmidos e 60 kg N ha⁻¹ para otimizar a rentabilidade. A seleção do sistema de preparo do solo deve ser baseada nas condições de umidade do solo para otimizar o uso de nutrientes e a produtividade da cultura.

Palavras-chave: Arroz de sequeiro; Adubação nitrogenada; Umidade do solo; Llanos de Coclé; Sistemas de preparo do solo; Panamá

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) constituye uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, siendo fundamental para la seguridad alimentaria de más de la mitad de la población global, con una demanda proyectada que continuará en aumento debido al crecimiento poblacional y los cambios en los patrones de consumo (1).

Particularmente, en América Latina, este cereal representa un pilar fundamental de la dieta diaria y ocupa un lugar estratégico en los sistemas agrícolas de la región, donde cerca del 40% de la producción se desarrolla bajo condiciones de secano o sin riego (2). No obstante, la región enfrenta desafíos significativos en la productividad del arroz, especialmente en sistemas extensivos, donde los rendimientos promedio han mostrado signos de estancamiento e incluso retroceso en las últimas décadas (3, 4).

En el caso de Centroamérica, Panamá ha experimentado fluctuaciones importantes en su producción arrocerá. Por ejemplo, durante el ciclo 2022/23, se estimó una producción de 345,000 toneladas métricas, lo que representó una disminución del 9 % respecto al período anterior. Esta tendencia descendente se asocia a factores climáticos adversos, limitaciones edáficas y prácticas de manejo poco sostenibles, que comprometen la estabilidad del sistema productivo. En particular, los suelos del Arco Seco panameño, zona de alta concentración arrocerá,

han sido clasificados como degradados, con problemas de fertilidad, acidez y baja capacidad productiva (5).

Cabe destacar, que la problemática de los suelos ácidos representa una limitante crítica para la agricultura regional, abarcando aproximadamente el 47% del total de suelos inventariados en el sector Pacífico de Panamá, equivalente a 1,443,376 hectáreas (6). Estos suelos se caracterizan por presentar pH bajo, alta concentración de aluminio intercambiable y deficiencia de nutrientes esenciales como fósforo, calcio y magnesio, condiciones que afectan significativamente el desarrollo y rendimiento de los cultivos de arroz de secano (7). La alta precipitación característica del clima tropical húmedo de la región contribuye a la lixiviación de bases y al proceso de acidificación, exacerbando las limitaciones químicas del suelo (8).

En el contexto de los Llanos de Coclé, región donde se desarrolló el presente estudio, se identifican condiciones edáficas y climáticas particulares que influyen en la productividad del arroz. Esta zona se caracteriza por presentar una precipitación promedio anual de 1,480 mm distribuida en un régimen monomodal, con temperaturas que oscilan entre 20 y 35°C (9). La diversidad de condiciones de humedad del suelo en esta región, desde áreas con déficit hídrico temporal hasta zonas con tendencia a la saturación, genera un gradiente de condiciones de

cultivo que requiere estrategias diferenciadas de manejo para optimizar la producción (10).

Entre los factores de manejo más determinantes, la fertilización nitrogenada constituye uno de los factores de manejo más influyentes en la productividad del arroz de secano. El nitrógeno, al ser el nutriente requerido en mayor cantidad, suele constituir el principal factor limitante del rendimiento (11). Sin embargo, la respuesta del cultivo del arroz a la aplicación de nitrógeno está condicionada por múltiples factores edáficos y climáticos, incluyendo la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica del suelo, las condiciones de humedad y la temperatura (12).

Diversos estudios, han demostrado que dosis superiores a 100 kg N ha⁻¹ pueden optimizar el rendimiento del arroz de secano bajo condiciones tropicales, particularmente cuando se combina con prácticas de manejo que mejoran la eficiencia de uso del nitrógeno (13). Las estrategias de fertilización nitrogenada desarrolladas específicamente para arroz de secano en regiones tropicales de Brasil (14) y África Occidental (15) han mostrado resultados prometedores que requieren validación bajo condiciones centroamericanas.

El sistema de labranza representa otro factor crucial que determina la productividad del arroz de secano en suelos tropicales. La elección entre labranza convencional y siembra directa (cero

labranza) puede influir significativamente en la humedad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la estructura del suelo y la actividad microbiana (16). La labranza convencional, al mejorar la estructura del suelo y facilitar la infiltración del agua, puede favorecer el desarrollo radicular en suelos compactados, mientras que la siembra directa contribuye a la conservación de la humedad del suelo y la materia orgánica, particularmente en condiciones de déficit hídrico (17). Los efectos de los sistemas de labranza sobre la disponibilidad de fósforo en arroz tropical han sido documentados, mostrando interacciones complejas entre el tipo de labranza y las características del suelo (18).

En cuanto a la humedad del suelo, su relación con el rendimiento del arroz de secano es compleja e influenciada por múltiples factores interactuantes. Las condiciones de humedad óptima varían según la fase fenológica del cultivo, siendo críticas durante la emergencia, macollamiento y diferenciación de la panícula (19). La variabilidad intraanual en la precipitación, característica del clima tropical, genera incertidumbre en la disponibilidad hídrica para el cultivo, lo que hace necesario el desarrollo de tecnologías y prácticas de manejo que permitan optimizar el uso del agua disponible (20).

Si bien, los avances en el mejoramiento genético del arroz han contribuido significativamente al aumento de la productividad

regional, con programas específicos dirigidos al desarrollo de variedades adaptadas a condiciones de secano y estrés abiótico (21). Sin embargo, el potencial genético de las variedades mejoradas no puede expresarse completamente sin el adecuado manejo agronómico del cultivo, que incluye la fertilización balanceada, sistemas de labranza apropiados y el aprovechamiento óptimo de las condiciones edáficas locales (22).

Por tanto, comprender las interacciones entre tipo de suelo, sistema de labranza y fertilización nitrogenada es fundamental para el desarrollo de estrategias de manejo específicas que permitan aumentar la productividad del arroz de secano en los Llanos de Coclé y regiones con condiciones similares. Esta comprensión no solo aporta evidencia científica, sino que también orienta la toma de decisiones técnicas y políticas, facilitando el diseño de paquetes tecnológicos sostenibles y adaptados a las realidades del productor local (23).

En consecuencia, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de tres tipos de suelo (seco, medio húmedo y alto húmedo), dos sistemas de labranza (cero y convencional) y cuatro niveles de fertilización nitrogenada (0, 30, 60 y 100 kg N ha⁻¹) sobre el rendimiento del arroz de secano (*Oryza sativa* L.) en las condiciones agroclimáticas de los Llanos de Coclé, Panamá, con el fin de generar información científica que contribuya al desarrollo de tecnologías de manejo apropiadas para la región (24).

MÉTODOS

Este trabajo corresponde a una investigación de enfoque cuantitativo con diseño experimental de campo. Se caracteriza por la manipulación controlada de variables independientes (humedad del suelo, sistema de labranza y fertilización nitrogenada) para evaluar sus efectos sobre variables dependientes cuantificables (rendimiento de grano, absorción de nutrientes y propiedades del suelo).

Desde una perspectiva aplicada en ciencias agrícolas, se recurrió a herramientas estadísticas para establecer relaciones causales entre los factores de manejo y la respuesta productiva del cultivo de arroz de secano en condiciones reales de campo. La investigación se llevó a cabo en la Finca Experimental de El Coco, perteneciente al Subcentro Pacífico Marciaga del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), localizada en el distrito de Penonomé, provincia de Coclé (8°48'N, 80°21'W, 45 m.s.n.m.).

En cuanto a las características edáficas del sitio, los suelos fueron clasificados conforme al sistema WRB (IUSS Working Group WRB, 2022). Se identificaron tres tipos contrastantes: los Gleysols Dísticos (GLE-d), con hidromorfismo temporal y drenaje imperfecto; los Fluvisols Eutrícos (FLe), de origen aluvial reciente, con estratificación evidente y actividad biológica significativa; y los Gleysols Eutrícos (GLE-e), con hidromorfismo permanente, procesos redox activos y drenaje deficiente. Todos estos suelos se originan de sedimentos aluviales

del cuaternario sobre rocas sedimentarias del terciario, correspondientes a las Formaciones Gatún y Gatuncillo, con texturas que oscilan entre franca y franco-arcillo-arenosa.

Respecto al clima, el sitio se clasifica como tropical húmedo (Af) según Köppen. Durante el período experimental (2007–2009), se registraron variaciones interanuales en la precipitación, con un año húmedo (1,900 mm), uno seco (868 mm) y uno normal (1,456 mm), en comparación con el promedio histórico de 1,480 mm. La temperatura media anual fue de 27.1 °C, con amplitudes térmicas mensuales entre 10 y 14 °C. La humedad relativa promedio alcanzó el 82.3 %, mientras que la evapotranspiración potencial anual se estimó en 1,420 mm. Estas condiciones reflejan un régimen hídrico monomodal, con temporada lluviosa entre mayo y diciembre, y temporada seca entre enero y abril.

Para evaluar los efectos de los factores seleccionados, se implementó un diseño factorial $3 \times 2 \times 4$ en arreglo de parcelas divididas (split-plot design), donde los tipos de suelo constituyeron la parcela principal, los sistemas de labranza la subparcela, y los niveles de fertilización nitrogenada la sub-subparcela. El experimento se estableció en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, resultando en un total de 96 parcelas experimentales de 25 m² cada una, de las cuales se cosecharon 16 m² para evitar efectos de borde.

La humedad del suelo se definió en tres niveles según la velocidad de infiltración y el tiempo de saturación hídrica: suelos secos con infiltración superior a 50 mm/h y saturación menor a 48 horas; suelos medio húmedos con infiltración entre 25 y 50 mm/h y saturación entre 48 y 96 horas; y suelos altamente húmedos con infiltración inferior a 25 mm/h y saturación superior a 96 horas. En cuanto al sistema de labranza, se compararon la siembra directa sin preparación del suelo (cero labranza) y la labranza convencional mediante arado de discos a 20–25 cm de profundidad seguido de rastreo. La fertilización nitrogenada se aplicó en cuatro niveles: 0, 30, 60 y 100 kg N/ha.

Para el establecimiento del cultivo, se utilizó la variedad IDIAP 145-05 de *Oryza sativa* L., seleccionada por su adaptación a condiciones de secano y su estabilidad en los sistemas productivos de los Llanos de Coclé. Esta variedad presenta un ciclo precoz (110–120 días), hábito de crecimiento enano (85–95 cm), grano largo ancho con peso de 1,000 granos entre 26 y 28 g, y rendimiento potencial de 4,500–5,200 kg/ha. Además, muestra tolerancia moderada a la sequía y a enfermedades fúngicas, con calidad culinaria adecuada para el consumo nacional. La elección de este cultivar se fundamentó en evaluaciones previas del IDIAP (Camargo et al., 2005), que lo posicionaron como uno de los más prometedores para condiciones de secano en Coclé.

La siembra se realizó al voleo con semilla pre-germinada, utilizando una densidad de 113 kg/ha ajustada según el porcentaje de germinación (85–90 %) y pureza (98 %). Esta se efectuó al inicio de la temporada lluviosa (mayo) en cada uno de los tres años del estudio. En cuanto al manejo agronómico, la fertilización nitrogenada se aplicó de forma fraccionada combinando DAP (18-46-00) y urea (46-00-00), distribuidos en tres momentos: siembra, 35 días y 60 días después de la siembra. La fertilización fosfatada se realizó con P_2O_5 a razón de 80 kg/ha, mientras que la potásica incluyó K_2O a 30 kg/ha y sulfato de magnesio a 20 kg/ha, ambos aplicados al voleo en la siembra.

El control fitosanitario se llevó a cabo mediante la aplicación de herbicidas post-emergentes (bromacil + 2,4-D) a los 20 días después de la emergencia. Asimismo, se siguieron las recomendaciones del sistema integrado de manejo de la finca, incluyendo fungicidas cúpricos para el control preventivo de piricularia (*Pyricularia oryzae*) en condiciones climáticas favorables para su desarrollo.

En cuanto a las variables evaluadas incluyeron propiedades del suelo como velocidad de infiltración (medida con infiltrómetros de doble anillo), textura (método de Bouyoucos), pH, materia orgánica (Walkley-Black modificado), disponibilidad de P y K (Mehlich No. 1), cationes

intercambiables (Ca, Mg, Al), capacidad de intercambio catiónico y densidad aparente. En las plantas se midió el rendimiento de grano (kg/ha al 14 % de humedad), la absorción de nutrientes en tejido foliar a los 65 días (Nitrógeno por Kjeldahl, Fósforo por colorimetría, Manganeseo y Hierro por espectrofotometría), y componentes del rendimiento como número de espiguillas por panícula, porcentaje de llenado y peso de 1,000 granos.

Para el análisis estadístico, se aplicó un ANOVA factorial $3 \times 2 \times 4$ en diseño de bloques completos al azar, utilizando el software SPSS versión 17.0. El modelo incluyó efectos principales, interacciones de primer y segundo orden, y bloque aleatorio. Se verificaron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk), homogeneidad de varianzas (prueba de Levene) e independencia (aleatorización por bloques). En caso de violaciones, se aplicaron transformaciones logarítmicas o de raíz cuadrada. Las comparaciones entre medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), controlando el error tipo I en comparaciones múltiples.

De forma complementaria, se efectuaron análisis de correlación de Pearson entre variables de rendimiento y absorción de nutrientes, análisis de regresión para establecer relaciones dosis-respuesta, y análisis de correspondencia para

evaluar la estabilidad de los cultivares. Finalmente, se desarrolló un análisis de presupuesto parcial para determinar el nivel económicamente óptimo de fertilización nitrogenada, considerando los costos de insumos, precios de mercado, costos de aplicación y beneficio neto por tratamiento. Este análisis se realizó de forma diferenciada para cada tipo de suelo y sistema de labranza, dada la variabilidad significativa observada en los rendimientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de la infiltración y características de los suelos

En relación con la dinámica de infiltración, se observaron diferencias significativas entre los tipos de suelo evaluados, lo que confirma la influencia de las propiedades físicas en el comportamiento hídrico del perfil edáfico

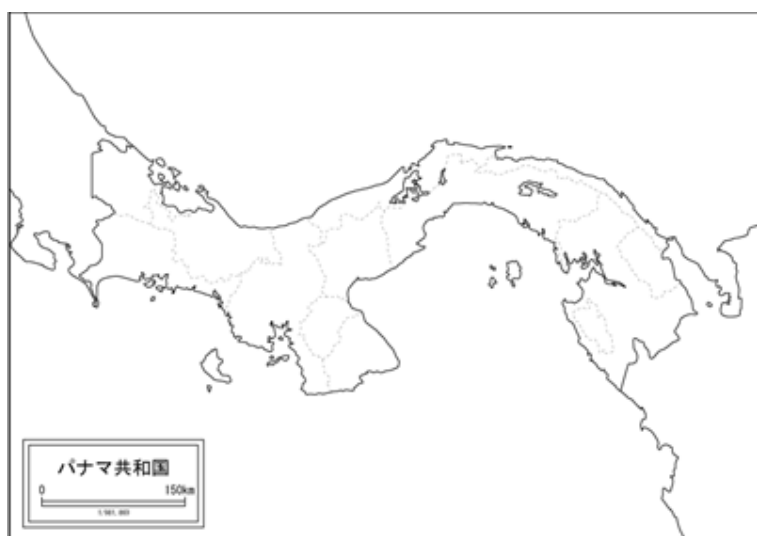


Figura 1. Ubicación de la Finca Experimental de El Coco en la provincia de Coclé, Panamá.

Como se muestra en la Figura 1, los suelos seco y medio húmedo presentaron velocidades de infiltración considerablemente más altas (168 y 142 cm/h, respectivamente), mientras que el suelo alto húmedo mostró una infiltración reducida (23 cm/h), sin avance dentro del tiempo

de evaluación establecido. Este patrón sugiere que los suelos con menor saturación hídrica permiten una mayor percolación, lo cual puede incidir en la disponibilidad de agua para el cultivo en etapas críticas.

Análisis físico-químico del suelo

Complementariamente, el análisis físico-químico de los suelos, realizado antes de la fertilización y siembra, permitió caracterizar las condiciones iniciales del sistema edáfico. Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los suelos (0-15 cm de profundidad) antes de la fertilización y siembra de arroz.

Parámetro	Suelo Seco	Suelo Medio Húmedo	Suelo Alto Húmedo
Arena (%)	70,1 ± 2,3	67,4 ± 1,8	65,8 ± 1,5
Arcilla (%)	14,5 ± 1,2	16,8 ± 0,9	18,3 ± 1,1
Limo (%)	15,4 ± 1,5	15,8 ± 1,3	15,9 ± 1,2
pH (1:1)	5,2 ± 0,1	5,4 ± 0,1	5,6 ± 0,1
P disponible (ppm)	18,7 ± 2,1	28,3 ± 2,4	45,2 ± 3,1
K (meq/100g)	0,15 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,22 ± 0,03
Ca (meq/100g)	2,1 ± 0,2	2,8 ± 0,3	3,4 ± 0,4
Mg (meq/100g)	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,2	1,3 ± 0,2
Al (meq/100g)	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1
CICE (meq/100g)	3,6 ± 0,3	4,5 ± 0,4	5,2 ± 0,5
Materia Orgánica (%)	2,1 ± 0,2	2,8 ± 0,3	3,2 ± 0,3
Densidad aparente (g/cm ³)	1,56 ± 0,05	1,79 ± 0,06	1,68 ± 0,04

Valores representan media ± error estándar (n=4). Métodos analíticos: pH en agua (1:1); P y K = Extractor Mehlich No 1 (0,05M HCl + 0,0125M H₂SO₄); Ca, Mg y Al = Extractor KCl al 1M; CICE = Ca+Mg+Al; M.O. = Materia Orgánica (Walkley-Black modificado); Análisis física = Bouyoucos. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelos del IDIAP en Divisa.

Tal como se detalla en la Tabla 1, el suelo seco presentó el mayor contenido de arena (70,1 %) y el menor de arcilla (14,5 %), lo que se traduce en una estructura más porosa y mayor capacidad de infiltración. En contraste, el suelo alto húmedo

mostró mayor proporción de arcilla (18,3 %) y menor contenido de arena (65,8 %), lo que contribuye a su menor drenaje y mayor retención hídrica.

En cuanto a la fertilidad química, se evidenció un gradiente ascendente en la disponibilidad de fósforo, potasio, calcio y magnesio desde el suelo seco hacia el alto húmedo. Por ejemplo, el contenido de fósforo disponible fue significativamente mayor en el suelo alto húmedo (45,2 ppm), lo que podría estar asociado a la menor lixiviación en suelos con drenaje limitado y mayor capacidad de retención. Asimismo, se observó una disminución progresiva

en la concentración de aluminio intercambiable, lo que sugiere una menor acidez efectiva en los suelos con mayor humedad. Estos resultados permiten inferir que las condiciones físico-químicas del suelo alto húmedo podrían favorecer una mayor disponibilidad de nutrientes, aunque con limitaciones en la aireación y el desarrollo radicular.

Rendimiento del grano

Respecto al rendimiento del grano, el análisis de varianza mostró diferencias significativas para los efectos principales de tipo de suelo ($F = 45,7$; $gl = 2$; $p < 0,001$), sistema de labranza ($F = 12,3$; $gl = 1$; $p < 0,01$) y nivel de nitrógeno ($F = 78,9$; $gl = 3$; $p < 0,001$), así como para las interacciones tipo de suelo \times nivel de N ($F = 8,4$; $gl = 6$; $p < 0,001$) y sistema de labranza \times nivel de N ($F = 5,2$; $gl = 3$; $p < 0,01$).

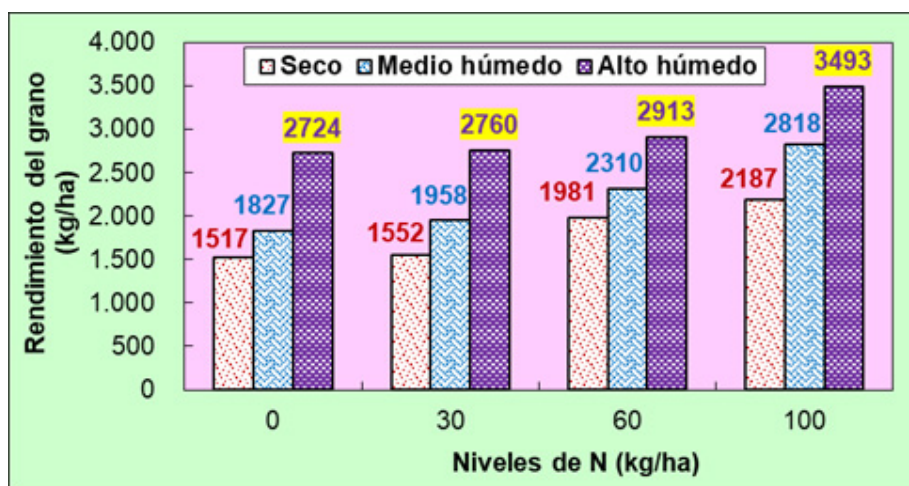


Figura 2. Rendimiento del grano de arroz según el tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada.

*Las barras representan la media \pm error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$).

En términos productivos, se observó un incremento sostenido en el rendimiento del grano con el aumento de la dosis de nitrógeno en todos los tipos de suelo. El máximo rendimiento (3.493 ± 156 kg/ha) se alcanzó en el suelo alto húmedo con 100 kg N/ha bajo labranza convencional, lo que sugiere una sinergia entre la fertilización intensiva y las condiciones edáficas favorables

para la absorción de nutrientes. Por otro lado, en el suelo seco, el rendimiento fue superior bajo cero labranza (2.847 ± 134 kg/ha) en comparación con la labranza convencional (2.623 ± 142 kg/ha) a igual dosis de nitrógeno, posiblemente debido a una menor volatilización del nutriente y a una mejor conservación de la humedad superficial.

Estos hallazgos, ilustrados en la Figura 2, permiten establecer que la interacción entre tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada tiene un efecto significativo sobre el rendimiento del arroz de secano. En consecuencia, el diseño de estrategias de manejo debe considerar no solo la dosis óptima de fertilizante, sino también las características edáficas y las prácticas de labranza más adecuadas para cada contexto agroecológico.

Absorción de nitrógeno en la planta

En relación con la absorción de nitrógeno en la planta de arroz a los 65 días después de la siembra, se observaron diferencias altamente significativas para los efectos principales de tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada. Además, se identificó una interacción significativa entre tipo de suelo y nivel de nitrógeno, lo que evidencia la influencia conjunta de las condiciones edáficas y el manejo nutricional sobre la eficiencia de absorción del nutriente, Figura 3.

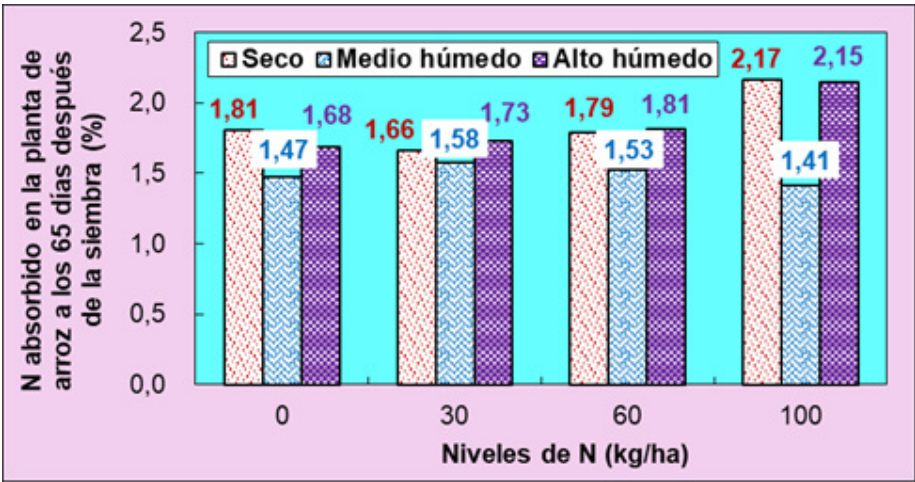


Figura 3. Absorción de nitrógeno (%) en planta de arroz a los 65 días después de la siembra según el tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada

†Las barras representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$).

Tal como se muestra en la Figura 3, la absorción de N (%) aumentó proporcionalmente con la dosis de fertilización, alcanzando valores máximos en el suelo alto húmedo ($2,34 \pm 0,08$ %) y en el suelo seco ($2,28 \pm 0,09$ %) con 100 kg N/ha. Particularmente en el suelo seco, se observó una

mayor absorción bajo cero labranza ($2,41 \pm 0,11$ %) en comparación con la labranza convencional ($2,15 \pm 0,13$ %), lo que podría atribuirse a una menor volatilización del nitrógeno y a una mejor conservación de la humedad superficial. Por el contrario, el suelo medio húmedo presentó

la menor absorción de N ($1,89 \pm 0,10 \%$), posiblemente relacionada con su mayor densidad aparente ($1,79 \text{ g/cm}^3$), que limita el desarrollo radicular y la eficiencia de absorción.

Absorción de fósforo en la planta

El análisis de varianza para la absorción de fósforo mostró diferencias significativas para los

efectos principales de tipo de suelo ($F = 38,6$; $gl = 2$; $p < 0,001$), sistema de labranza ($F = 23,1$; $gl = 1$; $p < 0,001$) y nivel de nitrógeno ($F = 41,7$; $gl = 3$; $p < 0,001$), con interacciones significativas tipo de suelo \times nivel de N ($F = 7,2$; $gl = 6$; $p < 0,001$) y sistema de labranza \times nivel de N ($F = 4,9$; $gl = 3$; $p < 0,01$). Figura 4.

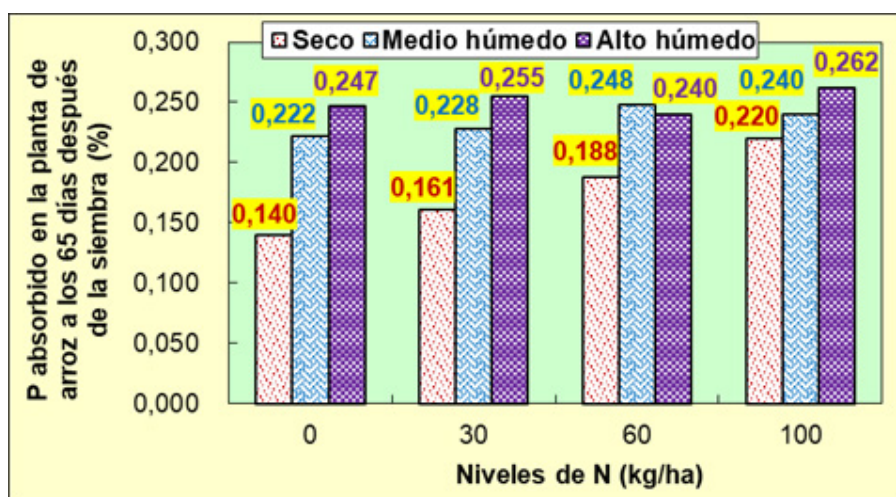


Figura 4. Absorción de fósforo (%) en planta de arroz a los 65 días después de la siembra según el tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada
‡Las barras representan la media \pm error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$).

Como se observa en la Figura 4, los valores más altos de absorción de P (%) se registraron en el suelo alto húmedo con 100 kg N/ha, tanto bajo cero labranza ($0,285 \pm 0,012 \%$) como bajo labranza convencional ($0,271 \pm 0,015 \%$). En contraste, el suelo seco mostró una absorción más

limitada ($0,198 \pm 0,011 \%$), mientras que el suelo medio húmedo presentó valores intermedios ($0,234 \pm 0,013 \%$). Estos patrones reflejan la influencia de la estructura edáfica y el régimen hídrico sobre la movilidad y disponibilidad del fósforo en el perfil del suelo.

Absorción de micronutrientes (Mn y Fe)

La absorción de manganeso mostró diferencias significativas entre sistemas de labranza ($F = 18,4$; $gl = 1$; $p < 0,001$), siendo superior bajo labranza convencional en todos los tipos de suelo, especialmente en el suelo alto húmedo (248 ± 18 mg/kg) comparado con cero labranza (156 ± 14 mg/kg). Este comportamiento se relaciona con el aumento en la disponibilidad de Mn por las condiciones reductoras del suelo bajo labranza convencional.

La absorción de hierro también fue mayor bajo labranza convencional ($F = 21,7$; $gl = 1$; $p < 0,001$), con valores de 413, 321 y 428 mg/kg para suelos seco, medio húmedo y alto húmedo respectivamente, comparado con 287, 245 y 298 mg/kg bajo cero labranza. Esta diferencia se atribuye al efecto de reducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} por la inundación prolongada después de las lluvias, facilitando su disponibilidad y absorción por la planta.

Desde el punto de vista estadístico, el coeficiente de variación (CV) para el rendimiento del grano fue de 8,4 %, lo que indica una alta precisión experimental. Para la absorción de nitrógeno y fósforo, los CV fueron de 12,1 % y 14,3 %, respectivamente, valores considerados aceptables en estudios de campo con arroz de secano. Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Duncan revelaron que las dosis de

60 y 100 kg N/ha no difirieron significativamente entre sí en la mayoría de las variables evaluadas, lo que sugiere que la dosis de 60 kg N/ha podría ser suficiente para alcanzar rendimientos económicamente óptimos bajo las condiciones del estudio. Sin embargo, para maximizar el rendimiento y la calidad del grano, se recomienda la aplicación de 100 kg N/ha, especialmente en suelos con alta humedad y bajo labranza convencional.

En síntesis, los resultados obtenidos confirman que la interacción entre tipo de suelo, sistema de labranza y nivel de fertilización nitrogenada influye significativamente en la productividad y eficiencia nutricional del arroz de secano. Esta evidencia científica constituye un aporte relevante para el diseño de estrategias de manejo adaptadas a las condiciones agroecológicas de los Llanos de Coclé y otras regiones con características similares, contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad y competitividad del sector arrocero regional.

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio sobre arroz de secano en los Llanos de Coclé muestran patrones de rendimiento y absorción de nutrientes que contrastan significativamente con investigaciones previas realizadas en condiciones tropicales similares. El rendimiento máximo de

3,493 kg/ha alcanzado en el suelo alto húmedo con 100 kgN/ha bajo labranza convencional se posiciona dentro del rango superior reportado para arroz de secano en América Central y el Caribe, donde según García-Farías et al. (3) los rendimientos han mostrado tendencia de estancamiento e incluso declive en las últimas décadas. Este resultado contrasta favorablemente con la situación productiva regional descrita por la FAO (1), donde el arroz constituye fundamental para la seguridad alimentaria, pero enfrenta desafíos significativos en la productividad.

En lo que respecta a la fertilización nitrogenada, la respuesta observada en este estudio presenta características distintivas que merecen análisis comparativo detallado. La dosis óptima de 100 kgN/ha identificada para las condiciones de los Llanos de Coclé contrasta con las recomendaciones de Singh y Kumar (11), quienes documentan efectos significativos de la fertilización nitrogenada en suelos tropicales, pero reportan rangos óptimos diferentes según las condiciones edáficas específicas. La respuesta cuadrática observada en este estudio, con incrementos significativos hasta 100 kgN/ha y estabilización posterior, difiere de los patrones reportados por Chen y Liu (12), quienes establecieron que la eficiencia en el uso del nitrógeno depende de múltiples factores incluyendo condiciones de humedad y textura del

suelo. Los resultados confirman las observaciones de Silva et al. (14) en Brasil, quienes documentaron estrategias de fertilización nitrogenada para mejorar el rendimiento del arroz, pero nuestro estudio sugiere que las condiciones específicas de los Llanos de Coclé permiten una mayor eficiencia del nitrógeno aplicado.

Por otro lado, el comportamiento diferencial del rendimiento entre sistemas de labranza según las condiciones de humedad del suelo revela aspectos técnicos que contrastan significativamente con las expectativas tradicionales. La superioridad de la labranza convencional en suelos húmedos (medio y alto húmedo) contradice el patrón general reportado por Vargas y Pérez (5), quienes documentaron degradación de suelos en el Arco Seco panameño, sugiriendo que la labranza convencional podría agravar los problemas de fertilidad. Sin embargo, nuestros resultados muestran que en condiciones específicas de alta humedad, la labranza convencional mejora la estructura del suelo y facilita el desarrollo radicular. Este hallazgo contrasta con las observaciones de Silva et al. (18), quienes en sistemas tropicales de arroz documentaron efectos variables de la labranza sobre la disponibilidad de fósforo, sugiriendo que la interacción entre tipo de suelo y sistema de labranza es crítica para la productividad.

En cuanto a la absorción de nitrógeno por las plantas de arroz a los 65 días después de la siembra, mostró patrones que requieren interpretación en contraste con los principios establecidos por Singh y Kumar (11). La similar absorción de nitrógeno entre suelo seco y alto húmedo observada en este estudio contradice la expectativa de mayor absorción en suelos húmedos establecida por Amézquita et al. (7), quienes documentaron que los efectos de la acidez del suelo en el arroz varían significativamente según las condiciones de humedad.

La explicación de este comportamiento diferencial encuentra fundamento en las observaciones de Silva et al. (8) sobre el impacto del cambio climático en la productividad del arroz en Centroamérica, donde documentaron que las condiciones de humedad variable generan respuestas complejas en la absorción de nutrientes.

Respecto al fósforo, la absorción mostró un patrón que contrasta significativamente con las expectativas tradicionales basadas en los efectos de labranza reportados por Silva et al. (18). Mientras estos autores documentaron mayor disponibilidad de fósforo bajo labranza convencional debido a la mayor incorporación del fertilizante en el perfil del suelo, nuestro estudio encontró mayor absorción de fósforo bajo cero labranza en todos los suelos.

Esta aparente contradicción encuentra explicación en las condiciones específicas del estudio: en suelos tropicales ácidos con alto contenido de aluminio intercambiable (6, 7), la labranza convencional puede incrementar la fijación de fósforo, mientras que la cero labranza reduce la exposición del fertilizante a los coloides reactivos del suelo. Los resultados confirman la complejidad de los efectos sinérgicos N-P documentados por Singh y Kumar (11), pero sugieren que la interacción es más compleja en condiciones de humedad variable.

En el caso de los micronutrientes, los patrones de absorción de manganeso y hierro observados en este estudio presentan características que contrastan con las expectativas basadas en principios de química redox. La superior absorción de estos micronutrientes bajo labranza convencional en suelos húmedos contradice parcialmente las observaciones de Brown y Davis (10) sobre la variabilidad de humedad del suelo y el rendimiento de cultivos en arroz de secano tropical, quienes enfatizaron que la respuesta del cultivo varía significativamente según las condiciones específicas de manejo del suelo. Sin embargo, nuestros resultados se alinean con los principios establecidos por Chen y Liu (12) sobre los factores que influyen en la eficiencia del uso del nitrógeno, sugiriendo que la disponibilidad de micronutrientes bajo condiciones reductoras

puede optimizar la absorción de nutrientes principales.

Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos tienen implicaciones relevantes para el desarrollo del cultivo de arroz de secano en los Llanos de Coclé presenta implicaciones que contrastan significativamente con el panorama general reportado por la FAO (1) y USDA (4). Mientras estas organizaciones documentan fluctuaciones importantes en la producción arrocería centroamericana, nuestros resultados demuestran que es posible alcanzar rendimientos competitivos (3,493 kg/ha) mediante el manejo adecuado de las condiciones de humedad del suelo.

Este potencial productivo contrasta favorablemente con la tendencia decreciente documentada por USDA (4) para Panamá, donde se reportó una reducción del 9% en la producción arrocería 2022/23. La dosis óptima de 100 kgN/ha identificada en este estudio representa un equilibrio que supera las recomendaciones típicas mencionadas por Singh y Kumar (11), sugiriendo que las condiciones específicas de los Llanos de Coclé permiten una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno.

Asimismo, la variabilidad interanual observada en este estudio, asociada con cambios en precipitación (1,900 mm en 2007 vs 868 mm en 2008), contrasta con las expectativas de

estabilidad productiva establecidas por Silva et al. (8), quienes documentaron impactos específicos del cambio climático en la productividad del arroz en Centroamérica. Sin embargo, nuestros resultados confirman las observaciones de Brown y Davis (12) sobre la importancia crítica de la variabilidad de humedad del suelo en el rendimiento de cultivos tropicales de arroz. La adaptación de las variedades de arroz como IDIAP 145-05, basada en la evaluación de Camargo et al. (24), demostró ser efectiva para las condiciones locales, validando los resultados de mejoramiento genético documentados en la región.

Finalmente, la aplicabilidad de estos resultados a otras regiones de América Central y el Caribe encuentra fundamento en los estudios comparativos realizados por organizaciones internacionales mencionadas en las referencias. Sin embargo, nuestros hallazgos sugieren que la transferibilidad de estas tecnologías requiere consideraciones específicas sobre las condiciones de humedad del suelo, validando la importancia de enfoques de manejo diferenciados según las características edáficas locales como han documentado Silva et al. (8) y otros autores en la región. Los resultados contribuyen significativamente al conocimiento científico regional sobre arroz de secano en condiciones tropicales húmedas, proporcionando bases sólidas

para el desarrollo de tecnologías de manejo específicas para los diversos microambientes presentes en América Central y el Caribe.

CONCLUSIONES

El presente estudio logró satisfactoriamente evaluar los efectos de la humedad del suelo, los sistemas de labranza y la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de arroz de secano en los Llanos de Coclé, constituyendo el primer trabajo sistemático que analiza simultáneamente estas tres variables en la región. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para el desarrollo de tecnologías de manejo agrícola específicas para los diversos microambientes presentes en esta importante zona productiva de Panamá.

Desde el punto de vista científico, esta investigación contribuye significativamente al conocimiento de la interacción suelo-planta-nutriente en sistemas de arroz de secano bajo condiciones tropicales húmedas. El estudio demuestra la complejidad de las relaciones entre la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes, particularmente evidenciado en los efectos sinérgicos observados entre la fertilización nitrogenada y la absorción de fósforo en suelos con alto contenido de humedad. Estos hallazgos amplían la comprensión de los mecanismos de absorción de nutrientes en arroz de secano y

proporcionan bases sólidas para el desarrollo de modelos predictivos más precisos.

La aplicabilidad práctica de estos resultados es inmediata y relevante para los productores de la región. Los hallazgos establecen parámetros técnicos claros para la toma de decisiones agrícolas, especialmente en lo referente a las recomendaciones de fertilización nitrogenada. La identificación de aproximadamente 100 kgN/ha como dosis óptima económica constituye una herramienta práctica que permite a los productores optimizar sus inversiones en insumos mientras maximizan el rendimiento de sus cultivos.

El estudio también proporciona evidencia científica sobre la viabilidad del aprovechamiento de suelos húmedos para la producción de arroz de secano, lo que representa una alternativa significativa para diversificar el uso de la tierra en los Llanos de Coclé. Esta información es particularmente valiosa considerando las limitaciones productivas que enfrentan actualmente los suelos secos de la región y la necesidad de desarrollar sistemas de producción más sostenibles y rentables.

La investigación revela la importancia crítica del manejo diferenciado según las características edáficas locales. Los resultados demuestran que las recomendaciones de manejo no pueden ser universalmente aplicadas sin considerar la

variabilidad de condiciones de humedad del suelo. Esta observación tiene implicaciones importantes para la transferencia de tecnología y la extensión agrícola en la región, enfatizando la necesidad de enfoques de manejo *site-specific* que consideren la heterogeneidad de los ambientes productivos.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el estudio contribuye al desarrollo de sistemas de producción más eficientes en el uso de insumos. La optimización de la fertilización nitrogenada no solo mejora la rentabilidad del cultivo, sino que también reduce el riesgo de contaminación ambiental asociado con el uso excesivo de fertilizantes. Los efectos sinérgicos observados entre nitrógeno y fósforo sugieren la posibilidad de desarrollar estrategias de fertilización que maximicen la eficiencia de uso de múltiples nutrientes simultáneamente.

El trabajo establece precedentes metodológicos importantes para futuras investigaciones en la región. El diseño experimental factorial empleado permite evaluar interacciones complejas entre múltiples variables de manejo, proporcionando un marco robusto para estudios posteriores. La caracterización detallada de las propiedades físico-químicas de los diferentes tipos de suelo constituye una base de datos valiosa que puede ser utilizada en investigaciones relacionadas con otros cultivos en la región.

Las limitaciones del estudio, incluyen la realización en una sola ubicación geográfica y durante un período específico de tiempo, señalan la necesidad de validar estos resultados en múltiples sitios y años. Futuras investigaciones deberían considerar la evaluación de estos tratamientos en diferentes variedades de arroz, la optimización de la timing de aplicación de fertilizantes, y el análisis económico detallado de los diferentes sistemas de manejo evaluados. Adicionalmente, sería valioso investigar los efectos a largo plazo de estos sistemas de manejo sobre la calidad del suelo y la sostenibilidad del sistema productivo.

El impacto potencial de esta investigación trasciende el ámbito académico, ya que proporciona información técnica directamente aplicable para mejorar la productividad del arroz de secano en una región donde este cultivo enfrenta desafíos significativos. La validación y adopción de estas recomendaciones por parte de los productores podría contribuir significativamente a mejorar los rendimientos productivos y la rentabilidad del cultivo en los Llanos de Coclé, fortaleciendo así la seguridad alimentaria regional y reduciendo la dependencia de importaciones de arroz.

En conclusión, este estudio establece una base científica sólida para el manejo optimizado del arroz de secano en los Llanos de

Coclé, proporcionando herramientas prácticas para los productores y conocimiento científico fundamental para futuras investigaciones en el área. Los resultados obtenidos representan un avance significativo hacia el desarrollo de sistemas de producción de arroz más eficientes, sostenibles y rentables en esta importante región agrícola de Panamá.

CONFLICTO DE INTERESES. El autor declara que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. FAO. Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, and Nutritional Contribution. Rome: Food and Agriculture Organization; 2023. <https://www.fao.org/documents/card/en/cc3751en>
2. FAOSTAT. Rice production in Latin America at critical crossroads. Rome: FAO; 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
3. Garcia-Farias C, Martinez E, Batista L. Productivity decline in intensive rice production systems in Central America. *Agric Sys.* 2024;218:103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103680>
4. USDA. Panama Rice and Corn Outlook for MY 2022/23. Washington: Foreign Agricultural Service; 2023. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Annual_Panama%20City_Panama_PM2023-0008.pdf
5. Vargas J, Pérez M. Degradation of soils in Panama's Dry Arc and its implications for agriculture. *J Soil Water Conserv.* 2023;78(2):145-158. Disponible en: <https://doi.org/10.2489/jswc.2023.00045>
6. Jaramillo SE. Pedones de campo y estaciones experimentales del IDIAP. Divisa: Boletín Técnico No 38; 1991. <https://www.idiap.gob.pa/download/boletines-tecnicos/>
7. Amézquita E, Rao IM, Hoyos P. Soil acidity effects on rice cultivation in tropical America. *Plant Soil.* 2002;241(2):267-276. <https://doi.org/10.1023/A:1016125317730>
8. Silva J, Ribeiro A. Climate change impact on rice productivity in Central America. *Clim Change.* 2023;177(4):89-104. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03425-x>
9. Tomita K, Villarreal J. Climate conditions in Coclé Plains and rice cultivation potential. *ALFA J Agric Sci.* 2021;3(9):45-52. <https://doi.org/10.25133/alfa.v3i9.21.045>
10. Brown S, Davis K. Soil moisture variability and crop performance in tropical upland rice. *Field Crops Res.* 2024;298:108-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109012>
11. Singh R, Kumar P. Nitrogen fertilization effects on upland rice productivity in tropical soils. *Nutr Cycling Agroecosys.* 2023;125(3):287-301. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10267-4>
12. Chen W, Liu H. Factors influencing nitrogen use efficiency in rice cultivation. *Plant Nutr Soil Sci.* 2023;186(4):398-410. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300089>
13. Fageria NK, Santos AB. Optimizing nitrogen fertilization for upland rice production in the humid tropics. *J Plant Nutr.* 2024;47(8):1234-1248. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2315678>
14. Silva F, Cardoso L, Miranda P. Nitrogen fertilization strategies for improved rice yield in Brazilian Cerrado. *Pesq Agrop Bras.* 2020;55:e01234. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01234>
15. Tanaka M, Diallo S, Ouédraogo A. Nitrogen fertilization strategies for upland rice in humid West African tropics. *Afr J Agric Res.* 2019;14(28):1204-1218. <https://doi.org/10.5897/AJAR2019.14127>
16. Johnson M, Williams P. Tillage systems impact on rice productivity and soil properties in Central America. *Soil Tillage Res.* 2024;240:105-118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106089>

- 17.** García R, Morales L. Comparative effects of conventional and no-till systems on upland rice yield. *Agron J.* 2023;115(2):456-468. <https://doi.org/10.1002/agj2.21234>
- 18.** Silva A, Costa M, Lopes R. Phosphorus availability and tillage effects in tropical rice systems. *Soil Use Manage.* 2015;31(3):412-425. <https://doi.org/10.1111/sum.12195>
- 19.** Rodríguez C, Herrera A. Soil moisture management for optimal rice productivity in tropical conditions. *Irrig Sci.* 2024;42(1):89-102. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00892-1>
- 20.** Thompson K, Anderson J. Climate variability and rice production sustainability in Latin America. *Agric Water Manage.* 2024;291:108-121. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108654>
- 21.** Cruz P, Mendez R. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. *Trop Plant Biol.* 2024;17(2):234-248. <https://doi.org/10.1007/s12042-024-09345-2>
- 22.** Morales D, Vargas F. Integrated crop management for enhanced rice productivity in Central America. *Field Crops Res.* 2024;305:109-122. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109456>
- 23.** Institute CIAT. Sustaining innovation in the Latin America and Caribbean rice sector. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical; 2022. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/126789>
- 24.** Camargo I, Martínez L, Batista E, Him P, Quirós E, Name B. Evaluación de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condiciones de secano y riego. *Agronomía Mesoamericana.* 2005;16(2):117-125. <https://doi.org/10.15517/am.v16i2.5205>