ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias
Volumen 10 / N° 29 / mayo-agosto 2026
https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.468

Articulo original

Impacto de suelo, labranza y nitrógeno en rendimiento de arroz de secano en Panamá

Impact of Soil Moisture, Tillage Systems, and Nitrogen Fertilization on Upland Rice Yield in Panam

Kentaro Tomita[a]
ktomita@espol.edu.ec

[a] *Universidad de Shinshu. Nagano, Japón*

Palabras clave: Arroz de secano; Fertilización nitrogenada; Humedad del suelo; Labranza; Nutrición vegetal; Panamá.

Keywords: Upland rice; Nitrogen fertilization; Soil moisture; tillage; Plant nutrition; Panama.

Cómo citar: Tomita K. Impacto de suelo, labranza y nitrógeno en rendimiento de arroz de secano en Panamá. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias. 2026;10(29):01-13. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.468

Resumen

Contexto: El arroz de secano (Oryza sativa L.) continúa siendo una opción estratégica para aprovechar ambientes agrícolas con disponibilidad hídrica irregular, aunque su productividad depende de interacciones complejas entre humedad del suelo, sistema de labranza y fertilización nitrogenada. **Objetivo:** Evaluar el efecto de tres condiciones de suelo, dos sistemas de labranza y cuatro dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de grano y la absorción de nutrientes del arroz de secano en la Finca Experimental El Coco, provincia de Coclé, Panamá. **Metodología:** Se empleó un arreglo factorial 3 × 2 × 4 en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los factores fueron condición edáfica o hídrica del suelo (seco, medio húmedo y alto húmedo), labranza (cero y convencional) y nitrógeno (0, 30, 60 y 100 kg N/ha). Se midieron velocidad de infiltración, propiedades físico-químicas del suelo, rendimiento de grano y absorción de N, P, K, Fe y Mn a 65 días después de la siembra. **Resultados:** La fertilización nitrogenada incrementó significativamente el rendimiento y la absorción de nutrientes, con respuesta más marcada en el suelo alto húmedo. El máximo rendimiento fue 3493 kg/ha con 100 kg N/ha y labranza convencional en suelo alto húmedo. En suelo seco, la cero labranza mostró ventaja relativa, probablemente por conservación de humedad y menor perturbación superficial. **Conclusiones:** La condición de humedad del suelo moduló la respuesta al nitrógeno y a la labranza. En los Llanos de Coclé, el arroz de secano puede ser viable si se ajusta la dosis nitrogenada al ambiente edáfico y se evita extrapolar una recomendación uniforme entre suelos contrastantes.

Abstract

Context: Upland rice (Oryza sativa L.) remains a strategic option for agricultural environments with irregular water availability, although productivity depends on complex interactions among soil moisture, tillage system and nitrogen fertilization. **Objective:** To evaluate the effect of three soil conditions, two tillage systems and four nitrogen rates on grain yield and nutrient uptake of upland rice at the El Coco Experimental Farm, Coclé Province, Panama. **Method:** A 3 × 2 × 4 factorial arrangement was established in randomized complete blocks with four replications. Factors were soil or hydrological condition (dry, medium-moist and high-moist), tillage (zero and conventional) and nitrogen rate (0, 30, 60 and 100 kg N/ha). Infiltration rate, soil physicochemical properties, grain yield and N, P, K, Fe and Mn uptake at 65 days after sowing were assessed. **Results:** Nitrogen fertilization significantly increased yield and nutrient uptake, with the strongest response in the high-moist soil. The maximum yield was 3493 kg/ha with 100 kg N/ha and conventional tillage in high-

moist soil. In dry soil, zero tillage showed a relative advantage, probably because of moisture conservation and lower surface disturbance. **Conclusions:** Soil moisture condition modulated the response to nitrogen and tillage. In the Coclé Plains, upland rice can be viable when nitrogen rate is adjusted to the edaphic environment and uniform recommendations are not extrapolated across contrasting soils.

Introducción

El arroz de secano constituye una alternativa productiva relevante para regiones tropicales donde la infraestructura de riego es limitada y la distribución de lluvias determina el éxito del cultivo. A diferencia del arroz bajo inundación permanente, el sistema de secano depende de la capacidad del suelo para infiltrar, almacenar y suministrar agua durante etapas fenológicas sensibles. Esta condición hace que la productividad sea más variable, pero también abre oportunidades para manejar el cultivo mediante decisiones agronómicas oportunas, especialmente la elección de la labranza y la sincronización de la fertilización nitrogenada. Estudios recientes en arroz de secano han demostrado que el rendimiento, la absorción de nitrógeno y la rentabilidad pueden modificarse sustancialmente cuando la dosis de N se ajusta al ambiente, a la fecha de siembra y a la disponibilidad de agua [1, 2].

En los Llanos de Coclé, Panamá, la variabilidad de los suelos dentro de una misma finca experimental representa un escenario adecuado para estudiar dichas interacciones. En el Arco Seco panameño, los agricultores suelen enfrentar suelos con baja fertilidad natural, alta acidez, diferencias marcadas de textura y periodos de déficit hídrico durante el ciclo del cultivo. Bajo estas condiciones, una recomendación general de fertilización puede resultar insuficiente o ineficiente, porque el mismo nivel de nitrógeno puede expresar respuestas distintas según la profundidad efectiva, la densidad aparente, la infiltración y la humedad disponible. En consecuencia, el rendimiento del arroz de secano no debe interpretarse solamente como resultado de la dosis de fertilizante, sino como expresión de una interacción suelo–agua–planta–manejo.

La labranza modifica la estructura superficial, la continuidad de poros, el contacto semilla–suelo y la exploración radical. En suelos con compactación o densidad aparente elevada, la labranza convencional puede favorecer temporalmente el crecimiento de raíces y la emergencia; sin embargo, también puede acelerar la mineralización de materia orgánica, aumentar la pérdida de humedad y reducir la estabilidad de agregados. En contraste, la cero labranza puede conservar humedad, proteger la superficie contra impacto de gotas de lluvia y disminuir perturbaciones, aunque su eficacia depende del tipo de suelo, cobertura y control de malezas. Investigaciones sobre sistemas arroceros han reportado que prácticas conservacionistas pueden mejorar agregación, carbono orgánico y disponibilidad de nutrientes en el mediano plazo [3], mientras que en arroz de secano de África occidental la combinación de cero labranza, cobertura de paja y N incrementó el rendimiento y redujo emisiones de CO_2 del suelo [8,9].

El nitrógeno es uno de los nutrientes más determinantes del crecimiento del arroz, debido a su participación en expansión foliar, síntesis de clorofila, macollamiento, formación de panículas y llenado de grano. No obstante, su eficiencia de uso suele ser baja cuando el fertilizante se aplica sin considerar el momento de mayor demanda, el estado hídrico del suelo o la posibilidad de pérdidas por volatilización, lixiviación y desnitrificación. Ensayos en arroz de secano han mostrado diferencias genotípicas y ambientales en eficiencia de uso de N [5,7], y también han evidenciado que el incremento de dosis puede mejorar rendimiento hasta un punto de meseta, después del cual predominan pérdidas económicas o ambientales [1,4]. Por ello, la recomendación agronómica debe equilibrar productividad, recuperación del nutriente y riesgo de pérdidas.

La disponibilidad hídrica condiciona la respuesta al nitrógeno. Bajo estrés por sequía, las raíces reducen absorción, disminuye el transporte de nutrientes y se afectan procesos fisiológicos como fotosíntesis, transpiración y partición de biomasa. En arroz de secano, la sensibilidad al déficit hídrico es mayor cuando coincide con macollamiento, iniciación de panícula, floración o llenado de grano. Estudios sobre estrés hídrico

y nitrógeno han demostrado que la interacción entre ambos factores puede explicar variaciones importantes en crecimiento y rendimiento [10-13]. Asimismo, comparaciones entre arroz aeróbico e inundado indican que el desempeño del cultivo depende de la disponibilidad de agua y N, pero también de la capacidad del sistema radical para explorar el suelo [14].

La literatura reciente coincide en que las decisiones de fertilización nitrogenada no deben desligarse del ambiente hídrico. En arroz de temporal con riego suplementario, las estrategias de manejo de N pueden mejorar simultáneamente rendimiento, productividad del agua y eficiencia de uso del nitrógeno [15]. Resultados obtenidos bajo riego ahorrador de agua, humedecimiento y secado alternado, y optimización conjunta de agua y N también muestran que el fraccionamiento del fertilizante y el control del régimen hídrico mejoran fotosíntesis, rendimiento, productividad del agua y eficiencia de uso del N [16-19]. En arroz de secano de Tailandia, la sincronización entre fecha de siembra y dosis de N incrementó la productividad y la rentabilidad, lo cual confirma la necesidad de ajustar recomendaciones al contexto climático de cada ciclo [2]. Estos antecedentes son pertinentes para Panamá, donde la estación lluviosa presenta variaciones intraanuales que influyen en la recarga de humedad y en la duración de periodos de anegamiento temporal.

El presente estudio se desarrolló en la Finca Experimental El Coco, del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, con el propósito de evaluar el efecto de tres condiciones de suelo, dos sistemas de labranza y cuatro niveles de fertilización nitrogenada en arroz de secano. La hipótesis de trabajo fue que los suelos con mayor humedad disponible expresarían mayor respuesta al N y a la labranza convencional, mientras que en el suelo seco la cero labranza podría ofrecer ventajas relativas por conservación de humedad superficial. Con base en esta hipótesis, se analizó el rendimiento de grano y la absorción de nutrientes para generar criterios de manejo aplicables a los Llanos de Coclé.

La relevancia del ensayo también radica en que muchas decisiones de manejo en arroz de secano se adoptan a escala de lote completo, aunque dentro del mismo predio existan microambientes contrastantes. Cuando el productor aplica la misma dosis de N y el mismo sistema de labranza a suelos secos y húmedos, parte de la inversión puede perderse por baja respuesta agronómica o por pérdidas del fertilizante. Un enfoque de manejo por ambientes, basado en observación de drenaje, análisis de suelo e historial de rendimiento, permite transformar la heterogeneidad del terreno en una herramienta de decisión. Por ello, los resultados se presentan no solo como comparación estadística, sino como base para formular recomendaciones diferenciadas según la restricción dominante de cada suelo.

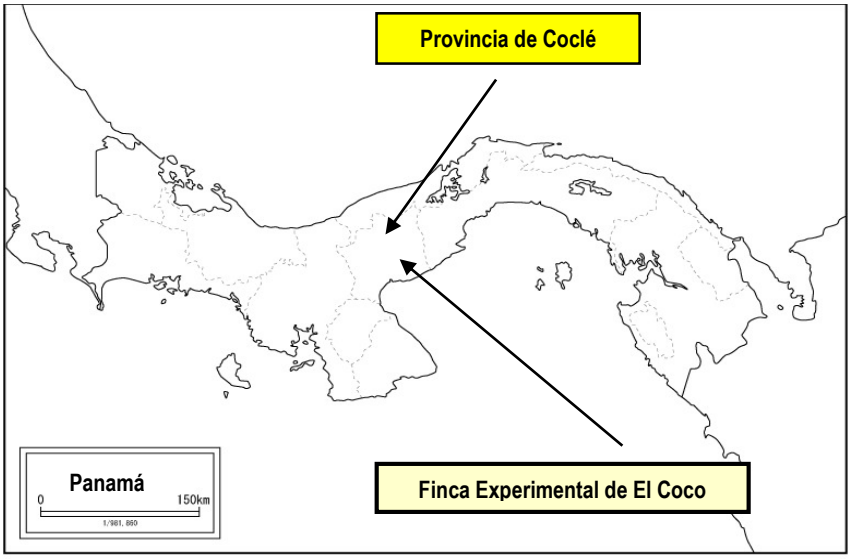

Figura 1. Ubicación de la Finca Experimental El Coco en la provincia de Coclé, Panamá.

Materiales y métodos

El experimento se estableció en la Finca Experimental de El Coco, también conocida como Subcentro Pacífico Marciaga del IDIAP, ubicada en el distrito de Penonomé, provincia de Coclé, Panamá (Figura 1). El sitio presenta clima tropical húmedo con precipitación media anual cercana a 1480 mm y temperaturas aproximadas entre 20 y 35 °C. Dentro de la finca se identifican áreas con diferencias notorias de drenaje y permanencia de humedad después de eventos de lluvia. Esta heterogeneidad permitió definir tres ambientes edáficos: suelo seco, suelo medio húmedo y suelo alto húmedo. La clasificación local se fundamentó en observaciones de campo, comportamiento de infiltración, color del perfil y permanencia de encharcamiento posterior a las lluvias. Este enfoque es congruente con estudios que relacionan distribución radical, absorción de nutrientes, tolerancia a sequía y productividad del arroz de secano con la disponibilidad de agua en el perfil [20,21].

Tabla 1. Características comparativas de los ambientes edáficos evaluados en El Coco, Coclé**.**

Variable	Suelo seco	Suelo medio húmedo	Suelo alto húmedo
Condición hídrica observada	Drenaje rápido y menor permanencia de humedad	Humedad intermedia con restricciones físicas	Mayor permanencia de humedad después de lluvia
Rasgo visual de calicata	Color marrón asociado a Fe oxidado	Coloraciones violáceas asociadas a Mn	Coloraciones violáceas y signos de mayor saturación
Arena superficial	70,1 %	No especificado en el texto original	65,8 %
Arcilla superficial	14,5 %	No especificado en el texto original	18,3 %
Densidad aparente superficial	1,56 Mg/m3	1,79 Mg/m3	1,68 Mg/m3
Interpretación agronómica	Mayor riesgo de déficit hídrico; posible ventaja de cero labranza	Mayor restricción para raíces; respuesta condicionada por estructura	Mayor potencial de respuesta a N si se evita restricción física

El diseño experimental fue factorial 3 × 2 × 4 con arreglo en bloques completos al azar y cuatro repeticiones. Los factores fueron: tres condiciones de suelo o humedad, dos sistemas de labranza y cuatro niveles de nitrógeno. Las condiciones de suelo se denominaron seco, medio húmedo y alto húmedo. Los sistemas de labranza fueron cero labranza y labranza convencional. Las dosis de N fueron 0, 30, 60 y 100 kg N/ha. La estructura del diseño permitió estimar efectos principales y combinaciones entre los factores, lo cual fue indispensable para interpretar si la respuesta a N era dependiente del suelo y de la labranza.

Antes de la siembra se realizó caracterización físico-química del suelo en la profundidad de 0 a 15 cm. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Suelos del IDIAP, Divisa, provincia de Herrera. El pH se determinó en agua con relación 1:1; P y K disponibles se extrajeron mediante Mehlich 1; Ca, Mg y Al se extrajeron con KCl 1 M; la CICE se calculó como suma de Ca, Mg y Al; la materia orgánica se estimó mediante Walkley–Black modificado, y la textura mediante el método de Bouyoucos. La descripción de calicatas durante la estación seca permitió observar diferencias visuales relevantes: tonalidades marrones asociadas a Fe oxidado en el suelo seco y coloraciones violáceas relacionadas con Mn en los suelos medio y alto húmedos (Figura 2).

Figura 2. Calicatas representativas: A) suelo seco; B) suelo medio húmedo; C) suelo alto húmedo.

La medición de infiltración se realizó en los tres tipos de suelo para describir la dinámica de entrada de agua en el perfil. El suelo seco mostró infiltración más rápida que los ambientes húmedos, mientras que el suelo alto húmedo presentó avance muy lento durante el periodo de observación. Este comportamiento se consideró un indicador indirecto de la capacidad de retención de agua y del riesgo de saturación temporal. La Figura 3 muestra el procedimiento de medición en campo, empleado como apoyo para clasificar los ambientes y explicar diferencias posteriores en rendimiento.

Figura 3. Evaluación de la infiltración en campo durante la caracterización de los ambientes edáficos.

La siembra se efectuó al voleo con 113 kg/ha de semilla, ajustados según el porcentaje de germinación. El manejo de fertilización se basó en la aplicación de fosfato diamónico como fuente principal de N al momento de la siembra y urea como fuente adicional a los 35 y 60 días después de la siembra. Para las dosis de 0, 30, 60 y 100 kg N/ha, la aplicación inicial fue 0, 30, 30 y 30 kg N/ha, respectivamente; las aplicaciones complementarias fueron 0, 0, 15 y 35 kg N/ha en cada uno de los dos momentos posteriores. Se aplicaron 80 kg/ha de P2O5 y una fertilización potásica con KCl y Sulfomag, con el fin de reducir la posibilidad de que P, K, Mg o S limitaran la respuesta al nitrógeno.

Tabla 2. Estructura experimental y manejo de fertilización nitrogenada**.**

Componente	Descripción
Diseño	Factorial 3 × 2 × 4 en bloques completos al azar
Repeticiones	Cuatro
Factor suelo	Seco, medio húmedo y alto húmedo
Factor labranza	Cero labranza y labranza convencional
Factor nitrógeno	0, 30, 60 y 100 kg N/ha
Aplicación inicial de N	0, 30, 30 y 30 kg N/ha, respectivamente
Aplicaciones complementarias	0, 0, 15 y 35 kg N/ha a 35 días; 0, 0, 15 y 35 kg N/ha a 60 días
Fertilización base	80 kg/ha de P2O5; KCl y Sulfomag como fuentes de K, Mg y S
Variables medidas	Infiltración, rendimiento de grano y absorción de N, P, K, Fe y Mn

El control de malezas, plagas y enfermedades se realizó de acuerdo con el manejo convencional de la finca experimental. Se evaluó el rendimiento de grano al final del ciclo y la absorción de nutrientes en tejido vegetal a los 65 días después de la siembra. Los nutrientes evaluados incluyeron N, P, K, Fe y Mn, seleccionados por su relevancia fisiológica y por su posible relación con la humedad del suelo y los procesos de oxidación-reducción. La respuesta agronómica se interpretó mediante análisis de varianza, considerando como significativos los efectos reportados al 5 % y 1 % de probabilidad.

Resultados

La caracterización inicial confirmó que los ambientes no diferían únicamente por humedad visible, sino también por atributos físicos asociados con movimiento y almacenamiento de agua. El suelo seco presentó 70,1 % de arena y 14,5 % de arcilla, mientras que el suelo alto húmedo registró 65,8 % de arena y 18,3 % de arcilla. Aunque estas diferencias de textura parecen moderadas, fueron suficientes para modificar la velocidad de infiltración y la permanencia de agua después de lluvia. La densidad aparente superficial fue de 1,56 Mg/m3 en el suelo seco, 1,79 Mg/m3 en el suelo medio húmedo y 1,68 Mg/m3 en el suelo alto húmedo. El mayor valor del suelo medio húmedo sugirió una condición más restrictiva para crecimiento radical, especialmente bajo cero labranza.

El contenido de P disponible fue relativamente mayor en el suelo alto húmedo, lo que pudo favorecer el crecimiento temprano cuando el nitrógeno no fue limitante. La menor infiltración observada en este suelo probablemente favoreció mayor permanencia de agua y redujo pérdidas inmediatas por percolación. Sin embargo, la retención de agua también implica un ambiente más reductor, capaz de modificar la disponibilidad de Fe y Mn. Por esta razón, la interpretación de la nutrición mineral se realizó integrando propiedades físicas, humedad y sistema de labranza, y no únicamente las concentraciones iniciales del suelo.

El rendimiento de grano respondió positivamente a la fertilización nitrogenada en todos los ambientes, con diferencias significativas al 1 % para suelo, labranza y dosis de N. La tendencia general fue ascendente conforme aumentó la dosis de N desde 0 hasta 100 kg N/ha, aunque la magnitud de la respuesta dependió de la condición edáfica. El suelo alto húmedo registró el mayor rendimiento, 3493 kg/ha, con 100 kg N/ha bajo labranza convencional. Este resultado evidenció que la disponibilidad de humedad fue un factor decisivo para aprovechar el fertilizante aplicado, especialmente durante las etapas de alta demanda fisiológica. La Figura 4 ilustra el vigor del cultivo en ambientes húmedos durante el desarrollo vegetativo y reproductivo.

A

B

Figura 4. Respuesta visual del cultivo en etapas vegetativa y reproductiva bajo ambientes húmedos.

La comparación entre sistemas de labranza mostró comportamientos contrastantes. En los suelos medio húmedo y alto húmedo, la labranza convencional produjo rendimientos superiores a la cero labranza, posiblemente porque redujo temporalmente restricciones físicas y facilitó el desarrollo de raíces en suelos con mayor densidad aparente. En el suelo seco, la cero labranza tuvo mejor desempeño relativo, lo cual puede atribuirse a menor pérdida de humedad superficial, menor exposición del suelo y reducción de la evaporación. Esta respuesta confirma que la labranza no puede recomendarse de manera uniforme: su beneficio depende de si el factor limitante principal es compactación, aireación, humedad o conservación de agua.

La absorción de N a los 65 días después de la siembra aumentó con la fertilización nitrogenada, especialmente en el suelo alto húmedo. En este ambiente, la permanencia de humedad después de lluvia pudo facilitar la disolución del fertilizante, el transporte hacia raíces y la continuidad de la absorción. En el suelo seco, la absorción de N fue relativamente elevada bajo cero labranza, lo que sugiere que la conservación de humedad pudo mejorar la utilización temprana del fertilizante. En cambio, el suelo medio húmedo presentó valores menores que los suelos seco y alto húmedo, probablemente por el efecto combinado de densidad aparente alta y limitaciones de exploración radical.

El patrón de absorción de N permite interpretar que el fraccionamiento aplicado en el ensayo fue agronómicamente adecuado, porque evitó concentrar todo el fertilizante en la siembra y permitió que una parte del N estuviera disponible durante fases de crecimiento activo. Esta respuesta es consistente con investigaciones que reportan incrementos en fotosíntesis, rendimiento y eficiencia de uso del agua cuando el N se distribuye en aplicaciones parciales bajo manejo hídrico controlado [(16)]. También coincide con estudios de humedecimiento y secado alternado, donde la respuesta al N depende de la sincronía entre agua, estado fisiológico y demanda de nutrientes [(17-19)].

Desde el punto de vista radical, el mejor desempeño del suelo alto húmedo sugiere que el cultivo mantuvo mayor continuidad en la exploración del perfil y en el transporte de nutrientes hacia la parte aérea. En arroz de secano, la distribución de raíces y la capacidad de absorber agua bajo regímenes contrastantes son rasgos directamente relacionados con absorción de nutrientes y rendimiento [(20)]. Por ello, la respuesta inferior del suelo medio húmedo no debe atribuirse solo a menor fertilidad química, sino también a restricciones físicas que pudieron limitar el crecimiento radical. Esta interpretación es reforzada por estudios de caracterización de raíces en arroz de secano y de tierras bajas bajo sequía, donde los rasgos radicales explican diferencias de desempeño agronómico [(21)].

La absorción de P siguió una tendencia general de incremento con la fertilización nitrogenada, aunque el P no se aplicó como factor experimental independiente. Esto indica que el N favoreció crecimiento y expansión radical, incrementando la demanda y extracción de otros nutrientes. La respuesta fue más clara en el suelo

alto húmedo, donde el P disponible inicial fue mayor. La absorción de K también se asoció con el crecimiento del cultivo; sin embargo, su interpretación debe considerar que se aplicó fertilización potásica uniforme para evitar deficiencias severas. En conjunto, N, P y K mostraron que la nutrición del arroz de secano funcionó como sistema integrado: la mejora de un nutriente esencial aumentó la demanda de los demás. La influencia del P, el pH y la textura en la absorción de P por arroz de secano ha sido documentada experimentalmente, por lo que el efecto positivo del N sobre crecimiento no elimina la necesidad de corregir limitaciones fosfatadas o de acidez cuando existan [25].

Figura 5. *Estado del cultivo cercano a cosecha y detalle de espigas desarrolladas.*

Tabla 3. Síntesis interpretativa de las principales respuestas agronómicas y nutricionales.

Respuesta	Hallazgo principal	Implicación de manejo
Rendimiento	Incrementó con N; máximo de 3493 kg/ha en suelo alto húmedo con 100 kg N/ha y labranza convencional	Ajustar dosis de N al potencial hídrico del suelo
Efecto de labranza	Convencional favoreció suelos húmedos; cero labranza favoreció relativamente el suelo seco	Seleccionar labranza según restricción dominante: compactación o conservación de agua
Absorción de N	Aumentó con fertilización; fue más efectiva en suelo alto húmedo	Fraccionar N y sincronizarlo con humedad disponible
Absorción de P y K	Aumentó con mayor crecimiento inducido por N	Mantener fertilización balanceada y análisis de suelo
Fe y Mn	Mayores bajo labranza convencional y ambientes húmedos	Monitorear micronutrientes en suelos con saturación temporal

Los micronutrientes Fe y Mn presentaron un patrón distinto. Sus valores fueron mayores bajo labranza convencional, en especial en suelos con mayor humedad. Esta respuesta pudo relacionarse con cambios de aireación, exposición de horizontes y condiciones redox, ya que Fe y Mn son sensibles a fluctuaciones de oxidación-reducción. Además, bajo estrés hídrico reproductivo se han descrito ajustes del metabolismo nitrogenado relacionados con el rendimiento del arroz, lo que refuerza la necesidad de interpretar nutrición mineral y estado hídrico como procesos acoplados, no independientes [22]. La presencia de coloraciones asociadas a Mn en los perfiles de los suelos húmedos apoya esta interpretación. Aunque el estudio no fue diseñado para evaluar toxicidad de micronutrientes, los resultados sugieren que el seguimiento de Fe y Mn es pertinente en ambientes de secano con encharcamiento temporal.

La síntesis de los resultados muestra que el mayor potencial productivo se concentró en el suelo alto húmedo, pero solo cuando el sistema permitió expresar una absorción suficiente de N. La comparación con evidencias

de agricultura de conservación y labranza profunda en sistemas arroceros indica que los efectos de labranza dependen del balance entre conservación de carbono, estructura, infiltración y disponibilidad real de agua para el cultivo [23,24]. La labranza convencional fue ventajosa en los suelos húmedos, mientras que la cero labranza fue más favorable en el suelo seco. Por tanto, el manejo recomendable debe diferenciar ambientes dentro de la finca. La Figura 5 muestra el estado del cultivo cercano a cosecha y el desarrollo de espigas, consistente con la respuesta observada en rendimiento.

Discusión

Los resultados confirman que la disponibilidad de humedad del suelo fue el eje que moduló la respuesta a la fertilización nitrogenada y a la labranza. En arroz de secano, el N aplicado solo se transforma en rendimiento cuando existe agua suficiente para sostener absorción, expansión foliar, fotosíntesis y llenado de grano. La máxima producción de 3493 kg/ha en suelo alto húmedo con 100 kg N/ha bajo labranza convencional es coherente con estudios que han encontrado incrementos de productividad cuando la dosis de N se ajusta al ambiente hídrico y a la demanda del cultivo [1,2,4]. La respuesta también coincide con evidencias de que el arroz de secano puede mejorar productividad del agua y eficiencia de uso de N cuando se sincronizan manejo nitrogenado y disponibilidad de humedad [15-19].

La ventaja de la labranza convencional en suelos medio y alto húmedos puede interpretarse como respuesta a restricciones físicas. El suelo medio húmedo presentó la densidad aparente más alta, condición que puede limitar elongación radical, aireación y acceso a nutrientes. Al remover el suelo, la labranza convencional habría generado un ambiente temporalmente más favorable para establecimiento y exploración radical. Este efecto, sin embargo, debe evaluarse con cautela porque la labranza intensiva puede degradar agregados y reducir carbono orgánico en el largo plazo. Estudios en sistemas arroceros muestran que prácticas conservacionistas mejoran agregación, carbono y nutrientes cuando se mantienen durante varios ciclos [3]. Por tanto, el beneficio de labranza convencional observado en un ciclo no necesariamente invalida estrategias conservacionistas de mediano plazo.

En el suelo seco, la cero labranza mostró mejor desempeño relativo que la labranza convencional. Este resultado es consistente con investigaciones en arroz de secano donde la cero labranza combinada con cobertura incrementó humedad del suelo, mejoró rendimiento y redujo emisiones de CO2 [8,9]. Aunque el presente ensayo no evaluó mulch ni cobertura de residuos como factor independiente, la menor perturbación superficial pudo reducir evaporación y conservar agua disponible en etapas tempranas. Para ambientes secos de Coclé, esta respuesta sugiere que la cero labranza o labranza reducida podría ser una opción preferente, siempre que se acompañe de control adecuado de malezas y manejo de residuos.

La respuesta positiva a N fue clara, pero no debe interpretarse como recomendación automática de aumentar dosis por encima de 100 kg N/ha. Ensayos de modelación y campo en arroz de secano han identificado umbrales económicos variables según fecha de siembra, ambiente y cultivar [1,2]. Además, la eficiencia de uso de N puede disminuir a dosis altas por pérdidas, baja recuperación o saturación de respuesta fisiológica [5,7]. En este estudio, 100 kg N/ha produjo el mayor rendimiento, pero sería necesario evaluar dosis intermedias entre 60 y 100 kg N/ha y estimar retorno económico para definir una dosis óptima local. La recomendación práctica más segura es aproximarse a 100 kg N/ha en suelos alto húmedos con buen potencial, pero ajustar a la baja en suelos secos o años con lluvia deficiente.

La interacción entre N y agua explica buena parte de los resultados. La literatura clásica y reciente demuestra que la sequía reduce crecimiento, absorción de N y rendimiento, y que la respuesta al fertilizante depende de la etapa del cultivo en que ocurre el déficit hídrico [10-12]. El sistema radical del arroz de secano cumple un papel central porque determina la capacidad de extraer agua de capas profundas y sostener absorción de nutrientes durante periodos secos [13]. En el presente experimento, el suelo alto húmedo probablemente

facilitó una mayor continuidad de absorción, mientras que el suelo seco exigió mecanismos de conservación superficial y rápida utilización del N disponible.

La absorción de P y K aumentó con la fertilización nitrogenada, resultado que puede atribuirse a mayor biomasa y demanda nutricional. Esta observación concuerda con estudios en Laos donde las respuestas del arroz de secano a N y P dependieron de cultivar, ambiente y disponibilidad de nutrientes [6]. En suelos ácidos o de baja fertilidad, la recomendación de N debe integrarse con P, K, corrección de acidez y manejo de materia orgánica. Aplicar N sin corregir otras limitaciones puede aumentar desbalances nutricionales y reducir eficiencia. Por ello, el análisis de suelo previo debe mantenerse como requisito técnico para formular recomendaciones por ambiente.

La presencia de Fe y Mn en mayor proporción bajo labranza convencional y suelos húmedos merece atención. En ambientes con saturación temporal, la reducción de óxidos puede aumentar la solubilidad de estos elementos. Aunque Fe y Mn son esenciales, concentraciones excesivas pueden afectar crecimiento radical y fisiología del arroz. El cultivo tolera mejor condiciones reductoras que otros cereales, pero en arroz de secano las alternancias entre oxidación y reducción pueden generar pulsos de disponibilidad. En consecuencia, el monitoreo de micronutrientes debe incorporarse en estudios futuros, especialmente si se promueven variedades sensibles o se intensifica el cultivo en áreas con encharcamiento frecuente.

El estudio tiene implicaciones prácticas para la agricultura de los Llanos de Coclé. Primero, el suelo alto húmedo tiene mayor potencial para arroz de secano cuando la labranza convencional reduce restricciones y el N se aplica fraccionado. Segundo, el suelo seco requiere prácticas que conserven humedad, por lo que la cero labranza puede ser favorable. Tercero, el suelo medio húmedo representa un ambiente intermedio, pero su densidad aparente elevada puede limitar respuesta si no se mejora la estructura. Cuarto, la fertilización nitrogenada debe fraccionarse, como se hizo en el ensayo, para sincronizar disponibilidad con demanda y disminuir pérdidas.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la decisión de labranza debe equilibrar rendimiento inmediato y salud del suelo. La labranza convencional puede aumentar rendimiento en suelos compactados durante un ciclo, pero su repetición sin aporte de residuos puede deteriorar estructura. La cero labranza puede conservar humedad y carbono, aunque requiere manejo más cuidadoso de malezas y cobertura. La integración de labranza reducida, residuos, rotaciones y fertilización ajustada por análisis de suelo permitiría avanzar hacia sistemas más resilientes. En sistemas basados en arroz, la agricultura de conservación puede mejorar las reservas de carbono orgánico, mientras que la labranza estratégica puede mejorar temporalmente el balance hídrico si existe compactación subsuperficial [23,24]. Esta visión es coherente con la evidencia internacional sobre arroz de secano, en la cual el mayor rendimiento se logra cuando el manejo de suelo, agua y N se considera de manera conjunta [3,8,9,15].

Futuros ensayos deberían incorporar mediciones de humedad volumétrica durante el ciclo, mineralización de N, pérdidas por volatilización, biomasa radical, retorno económico y eficiencia parcial de factor. También sería útil evaluar variedades con diferente arquitectura radical y eficiencia de uso de N, debido a la variabilidad genética documentada en arroz de secano [5,7]. La inclusión de coberturas o residuos permitiría comparar cero labranza pura con sistemas conservacionistas completos. Finalmente, los datos locales deberían integrarse a modelos de simulación para explorar escenarios de lluvia y fechas de siembra, como se ha realizado en otros ambientes de arroz de secano [1,2].

Una limitación del estudio es que las mediciones disponibles describen con mayor detalle la respuesta final que los procesos intermedios. El rendimiento y la absorción a 65 días permiten inferir mecanismos, pero no cuantifican directamente la dinámica diaria de agua, nitrógeno mineral, temperatura del suelo o pérdidas gaseosas. Tampoco se estimó formalmente la eficiencia agronómica del N ni el margen económico por tratamiento. Estas variables serían necesarias para transformar el resultado técnico en una recomendación

económica completa. Aun así, la consistencia entre mayor humedad, mayor absorción de N y mayor rendimiento aporta evidencia suficiente para sostener que la estratificación de ambientes debe incorporarse en el manejo local.

En términos de transferencia tecnológica, los hallazgos pueden comunicarse mediante reglas prácticas sencillas. Si el lote permanece húmedo varios días después de la lluvia y no presenta una compactación limitante irreversible, puede priorizarse una dosis alta y fraccionada de N cercana a 100 kg/ha, evaluando si la labranza convencional mejora el establecimiento. Si el lote drena rápidamente y muestra déficit hídrico temprano, la prioridad debe ser conservar humedad con cero labranza, cobertura o mínima remoción, evitando dosis altas de N que el cultivo no pueda aprovechar. Si el lote tiene humedad intermedia pero densidad aparente elevada, debe atenderse la estructura del suelo antes de esperar respuestas máximas al fertilizante.

Conclusiones

La productividad del arroz de secano en la Finca Experimental El Coco dependió de la interacción entre condición de humedad del suelo, labranza y fertilización nitrogenada. El suelo alto húmedo expresó el mayor potencial productivo y alcanzó 3493 kg/ha con 100 kg N/ha bajo labranza convencional.

En contraste, el suelo seco respondió mejor relativamente a la cero labranza, lo que sugiere un efecto favorable de conservación de humedad. La absorción de N y P aumentó con la fertilización, principalmente en ambientes húmedos, mientras que Fe y Mn se asociaron más con labranza convencional y condiciones de mayor humedad. Como recomendación agronómica, se propone aplicar alrededor de 100 kg N/ha en suelos alto húmedos con buen potencial, fraccionando la dosis y acompañándola de manejo de labranza según restricción dominante.

En suelos secos, debe priorizarse la conservación de humedad mediante cero labranza o labranza reducida. Las recomendaciones no deben generalizarse a toda la finca sin distinguir ambientes, porque la respuesta al N y a la labranza cambia de forma sustancial entre suelos.

Acerca de

Financiamiento: El autor declara que no recibieron financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: El autor declara no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: El protocolo del presente estudio fue sometido a revisión y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad, en cumplimiento de los principios éticos y normativas institucionales aplicables.

Historia del artículo: Artículo recibido 23 de enero 2026| Aceptado 27 de abril 2026 | Publicado 04 de mayo 2026

Referencias

1. Hussain T, Mulla DJ, Hussain N, Qin R, Tahir M, Liu K, et al. Optimizing nitrogen fertilization to enhance productivity and profitability of upland rice using CSM–CERES–Rice. Plants. 2023;12(21):3685. https://doi.org/10.3390/plants12213685

2. Hussain T, Gollany HT, Hussain N, Ahmed M, Tahir M, Duangpan S. Synchronizing nitrogen fertilization and planting date to improve resource use efficiency, productivity, and profitability of upland rice. Front Plant Sci. 2022;13:895811. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.895811

3. Nandan R, Singh V, Singh SS, Kumar V, Hazra KK, Nath CP, et al. Impact of conservation tillage in rice-based cropping systems on soil aggregation, carbon pools and nutrients. Geoderma. 2019;340:104-114. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.001

4. Alou IN, van der Laan M, Annandale JG, Steyn JM. Water and nitrogen use efficiency of upland rice (Oryza sativa L. × Oryza glaberrima Steud) under varying N application rates. Nitrogen. 2020;1(2):151-166. https://doi.org/10.3390/nitrogen1020013

5. Rakotoson T, Dusserre J, Letourmy P, Ramonta IR, Cao TV, Ramanantsoanirina A, et al. Genetic variability of nitrogen use efficiency in rainfed upland rice. Field Crops Res. 2017;213:194-203. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.023

6. Saito K, Linquist B, Atlin G, Phanthaboon K, Shiraiwa T, Horie T. Response of traditional and improved upland rice cultivars to N and P fertilizer in northern Laos. Field Crops Res. 2006;96(2-3):216-223. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.07.003

7. Fageria NK, de Morais OP, dos Santos AB. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. J Plant Nutr. 2010;33(11):1696-1711. https://doi.org/10.1080/01904167.2010.496892

8. Dossou-Yovo ER, Brüggemann N, Jesse N, Huat J, Ago EE, Agbossou EK. Reducing soil CO2 emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. Soil Tillage Res. 2016;156:44-53. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.001

9. Dossou-Yovo ER, Brüggemann N, Ampofo E, Igue AM, Jesse N, Huat J, et al. Combining no-tillage, rice straw mulch and nitrogen fertilizer application to increase the soil carbon balance of upland rice field in northern Benin. Soil Tillage Res. 2016;163:152-159. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.019

10. Alou I, Steyn J, Annandale J, van der Laan M. Growth, phenological, and yield response of upland rice (Oryza sativa L. cv. Nerica 4®) to water stress during different growth stages. Agric Water Manag. 2018;198:39-52. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.005

11. Prasertsak A, Fukai S. Nitrogen availability and water stress interaction on rice growth and yield. Field Crops Res. 1997;52(3):249-260. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00016-6

12. Castillo EG, Tuong TP, Singh U, Inubushi K, Padilla J. Drought response of dry-seeded rice to water stress timing and N-fertilizer rates and sources. Soil Sci Plant Nutr. 2006;52(4):496-508. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00064.x

13. Kondo M, Murty MV, Aragones DV. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress. Soil Sci Plant Nutr. 2000;46(3):721-732. https://doi.org/10.1080/00380768.2000.10409137

14. Belder P, Bouman BAM, Spiertz JHJ, Peng S, Castañeda AR, Visperas RM. Crop performance, nitrogen and water use in flooded and aerobic rice. Plant Soil. 2005;273(1-2):167-182. https://doi.org/10.1007/s11104-004-7401-4

15. Yan J, Wu Q, Qi D, Zhu J. Rice yield, water productivity, and nitrogen use efficiency responses to nitrogen management strategies under supplementary irrigation for rain-fed rice cultivation. Agric Water Manag. 2022;263:107486. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107486

16. Zhang Z, Zhang Y, Shi Y, Yu Z. Optimized split nitrogen fertilizer increase photosynthesis, grain yield, nitrogen use efficiency and water use efficiency under water-saving irrigation. Sci Rep. 2020;10(1):20310. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75388-9

17. Djaman K, Mel VC, Diop L, Sow A, El-Namaky R, Manneh B, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation regime and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of irrigated rice in the Sahel. Water. 2018;10(6):711. https://doi.org/10.3390/w10060711

18. Mboyerwa P, Kibret K, Mtakwa P, Aschalew A. Evaluation of growth, yield, and water productivity of paddy rice with water-saving irrigation and optimization of nitrogen fertilization. Agronomy. 2021;11(8):1629. https://doi.org/10.3390/agronomy11081629

19. Chen K, Yu S, Ma T, Ding J, He P, Dai Y, et al. Effects of water and nitrogen management on water productivity, nitrogen use efficiency and leaching loss in rice paddies. Water. 2022;14(10):1596. https://doi.org/10.3390/w14101596

20. Crusciol CAC, Soratto RP, Nascente AS, Arf O. Root distribution, nutrient uptake, and yield of two upland rice cultivars under two water regimes. Agron J. 2013;105(1):237-247. https://doi.org/10.2134/agronj2012.0298

21. Sandar MM, Ruangsiri M, Chutteang C, Arunyanark A, Toojinda T, Siangliw JL. Root characterization of Myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. Agronomy. 2022;12(5):1230. https://doi.org/10.3390/agronomy12051230

22. Lou D, Chen Z, Yu D, Yang X. SAPK2 contributes to rice yield by modulating nitrogen metabolic processes under reproductive stage drought stress. Rice. 2020;13(1):35. https://doi.org/10.1186/s12284-020-00395-3

23. Islam MA, Bell RW, Johansen C, Jahiruddin M, Haque ME, Vance W. Conservation agriculture practice influences soil organic carbon pools in intensive rice-based systems of the Eastern Indo-Gangetic Plain. Soil Use Manag. 2022;38(2):1217-1236. https://doi.org/10.1111/sum.12798

24. Dhaliwal J, Kahlon MS, Kukal SS. Deep tillage and irrigation impacts on soil water balance and water productivity of direct-seeded rice-wheat cropping system in north-west India. Soil Res. 2020;58(5):498-508. https://doi.org/10.1071/SR20018

25. Van Reuler H, Janssen B. The influence of soil phosphorus, pH and texture on the uptake of phosphorus from soil and fertilizer by upland rice. NJAS. 1996;44(4):249-261. https://doi.org/10.18174/njas.v44i4.536