

Materia orgánica y densidad aparente en un suelo Vertisol del Valle del Cauto, cultivado con *Oryza sativa* L. en Granma

Organic matter and bulk density in a vertisol soil from the Cauto valley, cultivated with *Oryza sativa* L. in Granma

Armando Rodríguez Rosa⁽¹⁾

Sergio F. Rodríguez Rodríguez⁽²⁾

María de los Ángeles Jiménez Pizarro⁽³⁾

Ana Deysi Fernández Franco⁽⁴⁾

Roberto Alejandro García Reyes⁽⁵⁾

Manuel José Linares Álvaro⁽⁶⁾

Oandis Sosa Sánchez⁽⁷⁾

(1) Ministerio de la Agricultura. UEB Frutas Selectas. Granma Cuba.

armandorodriguezrosa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4232-687X>

(2) Universidad de Granma. Cuba. sfrodiguez1964@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2923-5092>

(3) Universidad de Granma. Cuba. mjimenezp@udg.co.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1548-4135>

(4) Universidad de Granma. Cuba. anadeysifernandez997@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2722-8212>

(5) Delegación Provincial de la Agricultura en Holguín, Cuba. ralejandro9409@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8950-0268>

(6) Universidad de Granma. Bayamo, Cuba. cheche@udg.co.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1185-7822>

(7) Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales ACTAF Filial Granma. oandis.sosa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8231-3822>

Contacto: armandorodriguezrosa@gmail.com

Artículo enviado: 03/05/2026 \ Aprobado: 14/06/2026

Resumen

El estudio de las propiedades físicas y químicas del perfil edáfico en sistemas de arroz bajo inundación resulta fundamental para comprender la dinámica de nutrientes en condiciones anaeróbicas. El estudio de las propiedades físicas y químicas del perfil edáfico en sistemas de arroz bajo inundación resulta fundamental para comprender la dinámica de nutrientes en condiciones anaeróbicas. El propósito de la presente investigación radica en la evaluación de la materia orgánica y la densidad aparente del cultivo de *Oryza sativa* L. en la provincia de Granma, Cuba. El estudio se llevó a cabo en el contexto de un ensayo de producción en la Unidad Empresarial de Base (UEB) «Pedro Borrás Borroto» perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos «Fernando Echenique Urquiza», en un suelo Oscuro Plástico Gleyzado (Vertisol), donde se plantó el cultivar INCA LP-7. La toma de muestras se llevó a cabo mediante el método de la transversa a profundidades de 0-20 cm, 0-40 cm y 0-80 cm, con el propósito de determinar la materia orgánica y la densidad aparente. El procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante el análisis de varianza de clasificación simple. Se observaron diferencias significativas en la materia orgánica, la cual disminuyó desde un 2,5 % en la capa superficial hasta un 1,3 % a los 40 cm y un 0,80 % a los 80 cm, atribuible a la deposición de residuos vegetales y la desaceleración de la mineralización en profundidad. La densidad aparente registró valores decrecientes de 1,28 g cm⁻³; 1,14 g cm⁻³ y 1,01 g cm⁻³, lo que indica una mayor compactación superficial. Por otro lado, las capas profundas preservaron una estructura más porosa. Se determinó que el sistema exhibe un perfil edáfico dual, caracterizado por la acumulación de materia orgánica en la capa superficial y una menor densidad aparente en el subsuelo, lo que resulta en una distribución vertical heterogénea.

Palabras clave: manejo sostenible; productividad; rendimientos.

Abstract

The study of the physical and chemical properties of the soil profile in flooded rice systems is essential for understanding nutrient dynamics under anaerobic conditions. The study of the physical and chemical properties of the soil profile in flooded rice systems is essential for understanding nutrient dynamics under anaerobic conditions. The purpose of this research is to evaluate the organic matter content and bulk density of *Oryza sativa* L. crops in Granma Province, Cuba. The study was conducted as part of a production trial at the “Pedro Borrás Borroto” Base

Business Unit (UEB), which belongs to the “Fernando Echenique Urquiza” Agroindustrial Grain Company, on a Dark Plastic Gleyed (Vertisol) soil, where the INCA LP-7 cultivar was planted. Sampling was performed using the transect method at depths of 0–20 cm, 0–40 cm, and 0–80 cm, with the aim of determining organic matter content and bulk density. Data were analyzed using simple classified analysis of variance. Significant differences were observed in organic matter, which decreased from 2.5% in the surface layer to 1.3% at 40 cm and 0.80% at 80 cm, attributable to the accumulation of plant residues and the slowing of mineralization at greater depths. Bulk density showed decreasing values of 1.28 g cm⁻³, 1.14 g cm⁻³, and 1.01 g cm⁻³, indicating greater surface compaction. On the other hand, the deeper layers retained a more porous structure. It was determined that the system exhibits a dual edaphic profile, characterized by the accumulation of organic matter in the surface layer and a lower bulk density in the subsoil, resulting in a heterogeneous vertical distribution.

Key words: sustainable management; productivity; yields.

Introducción

El cultivo del arroz presenta una demanda significativa para la alimentación mundial, con una producción que supera los 700 millones de toneladas. Cuba se erige como una de las naciones con un elevado consumo de este cereal, alcanzando los 80,38 kg persona⁻¹ año⁻¹ (Del Valle et al., 2022). En el país, el cultivo se lleva a cabo en un total de 16 847 hectáreas, con una producción que alcanza las 266 596 toneladas. La producción agrícola del cultivo en cuestión es de 3,35 t ha⁻¹ y se encuentra en producciones de empresas estatales, cooperativas y del sector privado (Casanovas et al., 2022). A pesar de la relevancia del arroz para la economía cubana, su cultivo se realiza predominantemente de manera tradicional, mediante técnicas que implican el uso de herramientas como la grada de discos e inundación permanente. Estas prácticas contribuyen a la degradación de los suelos. En el contexto actual de cambio climático, la producción arrocería en Cuba enfrenta el imperativo de adaptarse para garantizar la provisión sostenible de alimentos a la población, al tiempo que debe preservar y mejorar la calidad de los suelos (Domínguez et al., 2020).

La calidad del suelo puede verse comprometida cuando se enfrenta a diversos cambios en su uso o cuando se aplican prácticas de manejo agropecuario inapropiadas. Estos usos tienen el potencial de alterar la regulación natural de los agroecosistemas, convirtiéndolos en sistemas con baja

resiliencia y altamente dependientes de insumos químicos externos y de la intervención humana (Mursec et al., 2018).

La aptitud del suelo se define como la capacidad del mismo para sostener y nutrir el crecimiento de los cultivos. Esta aptitud está asociada a la determinación de parámetros físicos y químicos del suelo, así como a los requerimientos nutricionales de los cultivos (Navidi et al., 2022). La literatura científica ha acumulado diversas metodologías para la evaluación de la idoneidad del suelo, donde tradicionalmente se han empleado características biofísicas de los cultivos mediante la recopilación de parámetros cualitativos y cuantitativos que han sido parametrizados por diversos métodos (Mugiyo et al., 2021).

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el contexto de la producción agrícola, específicamente en las áreas de la UEB «Pedro Borrás Borroto», perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos Fernando Echenique Urquiza en la provincia de Granma, Cuba. El suelo analizado corresponde a un suelo de tipo Oscuro Plástico Gleyzado (Vertisol), según lo definido por Hernández et al. (2015). El cultivo se realizó utilizando la variedad de arroz LP-7.

La toma de muestras de suelo se realizó utilizando el método de la transversa, con una profundidad de 0-20 cm, 0-40 cm y 0-80 cm. Se seleccionaron tres muestras de suelo de cada réplica para su análisis. La determinación del contenido de materia orgánica se llevó a cabo mediante el método de Walkley y Black (1934), mientras que la densidad aparente (g.cm^{-3}) se calculó siguiendo la metodología establecida por Gavande (1987).

Una vez recolectados los datos, se procedió a su procesamiento estadístico mediante un análisis de varianza de clasificación simple entre las tres profundidades. Para ello, se verificó el cumplimiento de las premisas de este análisis, se examinó la distribución normal de los datos mediante el test de Shapiro-Wilk y se evaluó la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Levene. La comparación múltiple entre los tratamientos se llevó a cabo mediante la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95,0 %. Para el procesamiento automatizado de los datos, se implementaron los paquetes estadísticos Infostat 2020 (Di Rienzo et al., 2020) para el análisis de varianza y la generación de gráficos.

Resultados y discusión

En el presente estudio, se evaluó la materia orgánica en tres profundidades distintas: 0-20 cm, 0-40 cm y 0-80 cm. Los resultados mostraron valores del 2,5 %, 1,3 % y 0,80 %, respectivamente (Figura 1). Estos hallazgos resultaron significativos, lo que sugiere la presencia de variaciones considerables entre las distintas capas. El bajo error garantiza la exactitud de las mediciones, lo que permite concluir que la disminución con la profundidad es un patrón auténtico y relevante. Esta distribución no resulta sorprendente, ya que, en sistemas de arroz bajo inundación, la materia orgánica tiende a acumularse en la superficie debido a la deposición de residuos vegetales, exudados radiculares y una menor descomposición en capas más profundas bajo condiciones anaeróbicas (Gutiérrez, 2020).

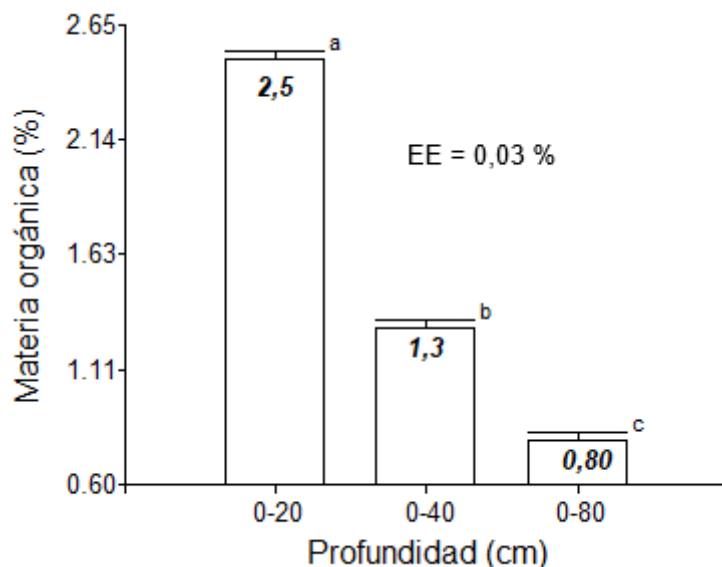


Figura 1. Valores medios y su error estándar de la materia orgánica evaluada en tres profundidades del suelo. Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de la prueba de Tukey.

Desde una perspectiva estadística, la disminución de la materia orgánica con la profundidad sugiere una distribución no uniforme, posiblemente influenciada por la acumulación de carbono en la zona superficial. Este patrón concuerda con los hallazgos globales que indican que los suelos de arrozal, que representan aproximadamente el 9 % de las tierras agrícolas mundiales, almacenan cantidades significativas de carbono, con una tendencia a disminuir conforme aumenta la profundidad (Zhang et al., 2021). La exactitud de las mediciones, con un error estándar de 0,03 %, reafirma la credibilidad de los resultados obtenidos. Estos hallazgos apuntan a que las

discrepancias observadas no son fortuitas, sino más bien el resultado de procesos edáficos y de gestión.

El gradiente vertical decreciente de materia orgánica (MO) detectado, que oscila desde el 2,5 % en el horizonte superficial (0-20 cm) hasta el 0,80 % a los 80 cm de profundidad, constituye un patrón consistente con la función de sumidero de carbono atribuida a los agroecosistemas arroceros inundados en escalas globales.

La distribución estratigráfica evidencia la concentración preferencial de la fracción particulada de materia orgánica (POM), compuesta por residuos vegetales frescos, exudados radiculares y biomasa microbiana reciente, en los primeros 20 centímetros del perfil edáfico, donde el aporte de fitomasa radicular y restos de cosecha es máximo. La disminución gradual hacia profundidades más elevadas refleja, en última instancia, el efecto inhibitor de las condiciones de anoxia permanente sobre la actividad de los microorganismos descomponedores aerobios. Este fenómeno permite que estos suelos almacenen significativamente más carbono orgánico que los sistemas agrícolas de secano, particularmente en la interfase oxic-anóxica superficial, donde la deposición de residuos vegetales alcanza su máximo nivel (Liu et al., 2021).

Sin embargo, la magnitud específica de la disminución observada entre los 40 y 80 cm (de 1,3 % a 0,80 %) sugiere la operación de mecanismos redox diferenciales que modulan selectivamente la tasa de mineralización en el perfil inferior.

En sistemas de riego continuo, se observa la presencia de un gradiente de potencial redox, caracterizado por condiciones reductoras estables en la superficie que, de manera paradójica, favorecen la preservación de compuestos lignificados recalcitrantes. En contraste, los estratos intermedios pueden experimentar microzonas de mayor oxigenación que aceleran la oxidación del carbono lábil. Esta dinámica explica por qué la pérdida de MO no sigue un decaimiento exponencial uniforme, sino que presenta una reducción pronunciada en el intervalo 40-80 cm, donde la interacción entre la limitada difusión de oxígeno desde la superficie y los procesos biogeoquímicos de oxidación subsuperficial genera condiciones transitorias que incrementan la tasa neta de descomposición respecto al horizonte superficial, aunque manteniendo stocks superiores a los suelos no saturados (Bai et al., 2024).

Desde una perspectiva molecular y de fraccionamiento físico, la composición química diferencial de la MO a lo largo del perfil corrobora el patrón de estabilización vertical observado,

evidenciando que el decaimiento cuantitativo no implica necesariamente una pérdida neta del potencial de secuestro.

El muestreo de alta resolución en suelos arroceros tropicales revela una distribución heterogénea del carbono orgánico y nutrientes disponibles, determinada principalmente por la profundidad del perfil y las prácticas de manejo. La variabilidad espacial vertical evidencia la necesidad de estrategias de fertilización localizadas para optimizar la disponibilidad nutricional en el sistema radical (Li et al., 2021).

El presente estudio se centra en el análisis de la composición de la superficie del suelo mediante resonancia magnética nuclear de ^{13}C y microscopía electrónica de transmisión con corrección de aberración. Los resultados obtenidos revelan que el carbono superficial, en un rango de profundidad comprendido entre 0 y 20 cm, se caracteriza por una predominancia de grupos funcionales O-alquilo, derivados de celulosa y carbohidratos microbianos. Estos compuestos presentan una alta susceptibilidad a la descomposición, pero se preservan temporalmente por la estabilización física en agregados macroscópicos bajo condiciones de saturación hídrica. En contraste, la fracción residual a 80 cm, aunque cuantitativamente menor (0,80 %), presenta una mayor proporción de compuestos aromáticos y carboxílicos asociados a minerales arcillosos (MAOC), indicativos de una humificación avanzada y una estabilización química a largo plazo bajo condiciones anaeróbicas profundas, donde la menor descomposición biológica favorece la acumulación relativa de formas geoquímicamente recalcitrantes (Jiang et al., 2023).

Los resultados obtenidos indican que la densidad aparente alcanza un valor de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ en la capa superficial (0-20 cm), disminuye a $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ en la profundidad de 0,40 cm y se estabiliza en $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ a 0,80 cm, con un error de estimación (EE) de $0,01 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 2).

La disminución progresiva de la densidad aparente con la profundidad indica una distribución heterogénea en el perfil del suelo, probablemente influida por los procesos de compactación y acumulación de materia orgánica en las capas superiores. La consistencia de los datos, sustentada por un EE de $0,01 \text{ g cm}^{-3}$, sugiere que tales discrepancias no son fortuitas, sino que reflejan respuestas específicas a la gestión del suelo bajo condiciones de inundación.

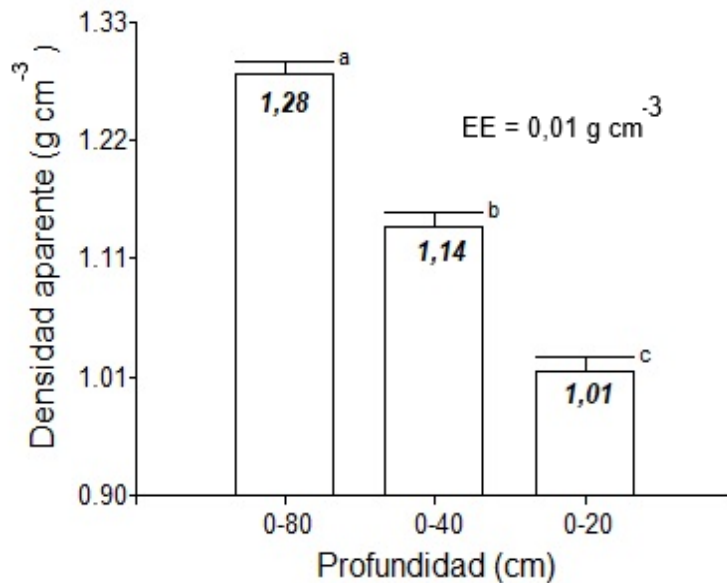


Figura 2. Valores medios y su error estándar de la densidad aparente evaluada en tres profundidades del suelo. Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de la prueba de Tukey.

Este fenómeno, que se ha observado en diversos estudios, concuerda con las investigaciones que identifican cómo la gestión del agua en los arrozales influye en la estructura del suelo, aumentando la porosidad en profundidad al reducir la compactación a largo plazo (Tang et al., 2018). Además, las condiciones anaeróbicas en suelos inundados tienden a preservar la estructura del suelo en capas más profundas, lo que explica la estabilización de la densidad aparente en $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ (Liu et al., 2021).

La densidad aparente posee una relación directa con el desarrollo radicular y la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Diversos estudios recientes han corroborado que los suelos con densidades aparentes cercanas a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ exhiben una mayor capacidad para fomentar la actividad radicular y la absorción de nutrientes, constituyendo un factor crítico para el incremento del rendimiento del arroz. Weiglein et al. (2022) señalan que la compactación superficial en suelos agrícolas exhibe variaciones en función de la intensidad del tráfico de maquinaria, lo cual podría constituir un factor explicativo de la densidad inicial más elevada en este caso particular.

La caracterización física de los agroecosistemas arrozales inundados revela patrones de densidad aparente verticalmente estratificados que responden a la acumulación diferencial de materia orgánica y a las condiciones de saturación hídrica permanente. Una revisión exhaustiva de la literatura científica sobre suelos bajo cultivo de arroz revela que la densidad aparente media oscila

en torno a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$. Este hallazgo sugiere que dichos sistemas actúan como sumideros de carbono, donde la fracción orgánica superficial influye en la estructura del suelo (Liu et al., 2021). Los valores decrecientes observados desde $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ en el horizonte 0-20 cm hasta $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ a los 80 cm de profundidad concuerdan con este patrón, donde la mayor concentración de materia orgánica en superficie contribuye a una matriz más densa y compactada, mientras que la disminución progresiva con la profundidad refleja la menor influencia de los aportes biológicos y la estabilización de la estructura porosa bajo condiciones reductoras permanentes (Gutiérrez, 2023).

Estos gradientes verticales se ven significativamente influenciados por las condiciones redox establecidas por el manejo hídrico continuo, las cuales determinan la tasa de descomposición de la materia orgánica y, en consecuencia, la estabilidad estructural del perfil. El estudio empírico sobre las prácticas de riego en arrozales ha evidenciado que la inundación permanente genera condiciones anaeróbicas que inhiben la actividad de microorganismos descomponedores. Este fenómeno, a su vez, preserva la estructura del suelo en capas profundas y reduce la compactación a largo plazo (Bai et al., 2024). Este fenómeno explica la estabilización de la densidad aparente en valores cercanos a $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ a 80 cm de profundidad, donde la ausencia de procesos oxidativos intensos mantiene la porosidad natural del suelo, en contraste con los horizontes intermedios (0-40 cm), donde la fluctuación redox puede incrementar parcialmente la densidad por procesos de oxidación y reacomodo de partículas.

Desde una perspectiva mecánica, el rango de densidades aparentes observado ($1,01\text{-}1,28 \text{ g cm}^{-3}$) se ajusta perfectamente a los valores críticos documentados para suelos arcillosos de arrozal en la cuenca del Yangtsé, donde se ha determinado que variaciones entre 1,0 y $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ definen el comportamiento físico-mecánico del suelo en la capa arable (Zheng et al., 2021). Los valores de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ registrados en la capa superficial del suelo indican una condición de ligera compactación que incrementa la resistencia al corte y la cohesión entre las partículas, propiedades que se ven influenciadas directamente por el contenido de humedad y la densidad del suelo. Sin embargo, la disminución progresiva hacia $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ a 40 cm sugiere una transición hacia condiciones más favorables para la penetración radicular. Por otro lado, la estabilización en $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ a 80 cm representa un óptimo estructural para el suelo, característico de arrozales bien drenados en profundidad.

La heterogeneidad vertical detectada no obedece exclusivamente a procesos pedogenéticos naturales, sino que refleja la influencia antrópica del tráfico de maquinaria agrícola concentrado en las capas superficiales. Diversos estudios realizados sobre el impacto del tránsito de maquinaria agrícola en suelos franco-limosos bajo cultivo de arroz han puesto de manifiesto que la frecuencia del tráfico mecanizado aumenta de manera significativa la densidad aparente en el horizonte de 0-20 cm, alcanzando valores superiores a 1,25 g cm⁻³, mientras que las capas inferiores conservan valores estables alrededor de 1,0 g cm⁻³ al no estar expuestas a presiones de contacto (Botta et al., 2006). Esta distribución concuerda con el patrón observado, donde el valor máximo de 1,28 g cm⁻³ en superficie probablemente refleja la compactación inducida por operaciones de labranza y tránsito de equipos, contrastando con la estabilidad estructural de los horizontes profundos que conservan su densidad natural inalterada por el tráfico.

La estabilización de la densidad aparente en 1,01 g cm⁻³ a 80 cm de profundidad adquiere relevancia biológica al considerar sus implicaciones para el desarrollo radicular y la disponibilidad de oxígeno en el sistema. Con base en investigaciones recientes, se confirma que los valores de densidad cercanos a 1,0 g cm⁻³ en suelos tipo *Albic paddy soil* (Soil Survey Staff, 2014) crean condiciones óptimas para la actividad radicular, facilitando la absorción de nutrientes y la aireación del sistema. Estos factores son críticos para el rendimiento del cultivo de arroz (Wang et al., 2022). La disminución significativa desde 1,28 g cm⁻³ hasta 1,01 g cm⁻³, respaldada por un error estándar de 0,01 g cm⁻³ que asegura la precisión de las mediciones, indica que el perfil del suelo presenta una estratificación física ideal, donde la capa superficial provee anclaje y la profundidad ofrece condiciones aireadas y esponjosas, optimizando el balance entre estabilidad estructural y funcionalidad biológica en el sistema radicular (Fernández, 2020).

La configuración física del perfil se sustenta en la relación inversa entre el almacenamiento de carbono orgánico y la densidad aparente. En este sentido, las fracciones de COS presentan una correlación negativa con la compactación edáfica en sistemas de doble cultivo de arroz y trigo. Por consiguiente, se establece una vinculación entre el secuestro de carbono y el incremento de la porosidad total del suelo (Gao et al., 2020). Esta dinámica queda evidenciada en la estratificación vertical detectada, donde la concentración superficial del 2,5 % de materia orgánica coexiste con la mayor densidad aparente (1,28 g cm⁻³), mientras que el cultivo prolongado bajo inundación promueve la mejora de las propiedades físicas y la multifuncionalidad de los horizontes subsuperficiales (Zhu et al., 2023), permitiendo que las capas profundas (0-80 cm) se estabilicen

en densidades menores ($1,01 \text{ g cm}^{-3}$) con funcionalidad hidráulica y estructural optimizada pese a su menor dotación orgánica.

La configuración física del perfil se sustenta en la relación inversa entre el almacenamiento de carbono orgánico y la densidad aparente. En este sentido, las fracciones de COS presentan una correlación negativa con la compactación edáfica en sistemas de doble cultivo de arroz y trigo. Por consiguiente, se establece una vinculación entre el secuestro de carbono y el incremento de la porosidad total del suelo (Gao et al., 2020). Esta dinámica queda evidenciada en la estratificación vertical detectada, donde la concentración superficial del 2,5 % de materia orgánica coexiste con la mayor densidad aparente ($1,28 \text{ g cm}^{-3}$), mientras que el cultivo prolongado bajo inundación promueve la mejora de las propiedades físicas y la multifuncionalidad de los horizontes subsuperficiales (Zhu et al., 2023), permitiendo que las capas profundas (0-80 cm) se establezcan en densidades menores ($1,01 \text{ g cm}^{-3}$) con funcionalidad hidráulica y estructural optimizada pese a su menor dotación orgánica.

Conclusiones

La materia orgánica en el perfil del suelo arrocero inundado exhibe una distribución vertical decreciente, alcanzando su máximo nivel de expresión en el horizonte superficial (0-20 cm) con un contenido del 2,5 %, y disminuyendo progresivamente hasta el 1,3 % a los 40 cm y el 0,80 % a los 80 cm de profundidad. Este gradiente estratigráfico evidencia la acumulación preferencial de restos vegetales, raíces y metabolitos microbianos en la capa arable, donde la deposición de biomasa es continua, y la estabilización de estos valores en profundidad, consecuencia directa de la desaceleración de los procesos de mineralización bajo estrictas condiciones anaeróbicas que prevalecen en los estratos inferiores durante el periodo de inundación.

La densidad aparente, por su parte, manifiesta una tendencia de disminución gradual desde la superficie hasta el subsuelo, con valores registrados de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ en los primeros 20 cm, $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ a los 40 cm de profundidad, y alcanzando un valor estable de $1,01 \text{ g cm}^{-3}$ a los 80 cm, con un error estándar de $0,01 \text{ g cm}^{-3}$ que valida la precisión de estas diferencias. La reducción vertical indica que los horizontes superficiales presentan un mayor grado de compactación, el cual es consecuencia de la interacción entre el tráfico mecanizado y la cohesión física proporcionada por la alta materia orgánica. En contraste, las capas profundas exhiben una estructura esponjosa y de

baja densidad, propiedades que optimizan la porosidad para el desarrollo radicular y el almacenamiento de agua en el perfil subsuperficial.

La interrelación entre estas dos variables revela una correlación inversa funcional a lo largo del perfil evaluado, donde la coincidencia de alta materia orgánica y mayor densidad aparente en la capa superficial (0-20 cm) genera un estrato fértil y estable, aunque resistente a la penetración, mientras que la convergencia de bajo contenido orgánico y densidad mínima (1,01 g cm⁻³) en los 80 cm constituye una zona de alojamiento radicular óptima. La presente investigación aborda la configuración vertical heterogénea del sistema de arroz bajo inundación, la cual evidencia un desarrollo natural de un perfil dual: una capa superficial (0-20 cm) que retiene nutrientes y soporta la presión del tráfico agrícola, y un subsuelo (0-80 cm) que, a pesar de su menor dotación orgánica, ofrece condiciones físicas de aireación y penetrabilidad esenciales para la expansión del sistema radical y la productividad del cultivo.

Bibliografía

- Bai, X., Smidt, S. J., Her, Y. G., Li, Y., Kim, D., Manirakiza, N., Duriancik, L., & Bhadha, J. H. (2024). Sensitivity of redox conditions to irrigation practice and organic matter decomposition in a rotational flooded rice (*Oryza sativa*) cropping system. *Journal of Environmental Quality*, e70087. <https://doi.org/10.1002/jeq2.70087>
- Botta, G. F., Jorajuria, D., Draghi, L., & Rosatto, H. (2006). Light tractor traffic frequency effects on soil compaction and crop yield in silty loam Mollic Vertic Argiudoll. *Ciencia del Suelo*, 24(2), 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.014>
- Casanovas, E., Suárez del Villar, A., Álvarez, A., & Avilleira, I. (2022). Valoración de la seguridad alimentaria cubana a partir de la superficie agrícola explotada y los rendimientos agrícolas. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(5), 304-314. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v14n5/2218-3620-rus-14-05-304.pdf>
- Cid-Lazo, G., López-Seijas, T., Herrera-Puebla, J., & González-Robaina, F. (2021). Variación de la densidad aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(2), e01. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586266250001/html/>

- Del Valle, J., González, D., Rafael, L., Sánchez, O. R., & Delgado, C. (2022). Efecto de las variables climáticas sobre el rendimiento agrícola del arroz (*Oryza sativa* L.). *Revista Ingeniería Agrícola*, 12(1), 29-33.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020* [Software]. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Domínguez, C., Díaz, G., Domínguez, D., Miranda, A., Duarte, C., Ruiz, M., Rodríguez, A., & Martín, R. (2020). Influencia de la Agricultura de Conservación sobre propiedades del suelo bajo cultivo de arroz irrigado. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(3), 75-83.
- Gao, W., Wu, J., Li, Y., & Wang, X. (2020). Soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a rice-wheat rotation system. *Soil and Tillage Research*, 199, Article 104576. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104576>
- Gavande, S. A. (1987). *Física de suelos: Principios y aplicaciones* (1ª ed.). Limusa.
- Hernández, J. A., Jiménez, P. J. M., Bosch, I. D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. https://ediciones.inca.edu.cu/files/libros/clasificacionsueloscuba_%202015.pdf
- xJiang, S., Liu, X., Lu, Y., Wu, J., Zhang, L., Wang, J., & Wu, W. (2023). Profile and nano-scale distribution of soil organic carbon for upland and paddy soils from an alluvial plain in South China. *Chemical Geology*, 640, Article 121740. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121740>
- Li, X., Han, Z., Zhao, W., Zhang, L., Li, Z., & Chen, Z. (2021). Distribution and determinants of organic carbon and available nutrients in tropical paddy soils revealed by high-resolution sampling. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, Article 107565. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107565>
- Liu, Y., Ge, T., van Groenigen, K. J., Bai, X., Liu, B., Guggenberger, G., & Kuzyakov, Y. (2021). Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. *Communications Earth & Environment*, 2(1), Article 154. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>

- Mugiyo, H., Chimonyo, V. G., Sibanda, M., Kunz, R., Masemola, C. R., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2021). Evaluation of land suitability methods with reference to neglected and underutilised crop species: A scoping review. *Land*, 10(2), Article 125. <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/2/125/pdf>
- Mursec, M., Leveque, L., Chaussod, R., & Curmi, P. (2018). The impact of drip irrigation on soil quality in sloping orchards developed on marl – a case study. *Plant and Soil Environment*, 64, 20-25. <https://doi.org/10.17221/623/2017-pse>
- Navidi, M. N., Seyedmohammadi, J., & McDowell, R. W. (2022). A proposed new approach to identify limiting factors in assessing land suitability for sustainable land management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(19), 2558-2573. https://www.researchgate.net/profile/JavadSeyedmohammadi/publication/361561907_A_Proposed_New_Approach_to_Identify_Limiting_Factors_in_Assessing_Land_Suitability_for_Sustainable_Land_Management/links/649273ce8de7ed28ba40a0cd/A-Proposed-New-Approach-to-Identify-Limiting-Factors-in-Assessing-Land-Suitability-for-Sustainable-Land-Management.pdf
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Tang, H., Li, C., Xiao, X., Pan, X., Cheng, K., Li, W., & Wang, K. (2018). Effects of long-term organic matter application on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in a double-cropping rice field. *Environmental Research Letters*, 17(7), Article 074002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4c5e>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 34(1), 29-38.
- Wang, Z., Ma, J., Liu, S., Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, S., & Wang, X. (2022). Effects of different water management and fertilizer methods on soil temperature, radiation and rice growth. *Scientific Reports*, 12, Article 16287. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20764-w>

- Weiglein, A., Lehmann, J., & Solomon, D. (2022). Key predictors of soil organic matter vulnerability to mineralization differ with depth at a continental scale. *Biogeochemistry*, 157(1), 87-107. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00873-5>
- Zhang, L., Zhuang, Q., Zhao, H., Wang, P., Ma, X., Yuan, W., Wang, D., & Dai, Y. (2021). Biogeochemistry of paddy soils: A review on microbial biomass and activity. *Geoderma*, 401, Article 115339. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115339>
- Zheng, K., Cheng, J., Xia, J., Liu, G., & Xu, L. (2021). Effects of soil bulk density and moisture content on the physico-mechanical properties of paddy soil in plough layer. *Water*, 13(16), Article 2290. <https://doi.org/10.3390/w13162290>
- Zhu, H., Zhang, X., Li, J., & Wang, Y. (2023). Long-term rice cultivation improved coastal saline soil properties and multifunctionality of subsoil layers. *Soil Use and Management*, 39(3), 987-1001. <https://doi.org/10.1111/sum.12945>