



# Dinámica y almacenamiento hídrico en un suelo con rasgos redoximórficos del valle interandino tropical: implicaciones del umbral estructural en condiciones de endosaturación

## Water dynamics and storage in a soil with redoximorphic features of the tropical inter-Andean valley: implications of the structural threshold under endosaturation conditions

Oscar Eduardo Trujillo Obando<sup>1</sup>✉, Enrique Alejandro Torres Prieto<sup>1</sup>, Armando Torrente Trujillo<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

<sup>2</sup>Universidad Surcolombiana – CENIGAA



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 68 - 76 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 20/03/2026 - ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

En valles interandinos tropicales, suelos con alto potencial de fertilidad suelen presentar severas limitaciones físicas, químicas y en consecuencia biológicas. Este estudio caracterizó la dinámica y el almacenamiento hídrico de un suelo con rasgos redoximórficos en el Valle del Cauca (Colombia) para comprender las restricciones de su umbral estructural sometido a condiciones de endosaturación. Se evaluó la estratigrafía, mineralogía de arcillas (DRX), retención hídrica (modelo de Van Genuchten), dinámica freática - piezométrica y conductividad hidráulica saturada (KSat) bajo precipitación bimodal. Los resultados muestran una transición abrupta: un epipedón de matriz superficial arcillosa (0-60 cm), dominada por cloritas expansivas que inducen sellamiento, superpuesta por un horizonte subsuperficial conformado de depósitos arenosos. El modelo de Van Genuchten evidenció alta porosidad a saturación ( $\theta_s = 0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), pero una lámina de agua aprovechable críticamente estrecha ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). El hidropereodo reveló rápidos ascensos freáticos en condiciones ántraquicas en los primeros 40 cm, colapsando la KSat. Se confirma una "paradoja hidromórfica", donde el potencial químico es restringido por la rápida asfixia radicular. En conclusión, el manejo agronómico exige ineludiblemente implementar drenaje subsuperficial para desbloquear la productividad.

**Palabras clave:** Dinámica Agua-suelo, nivel freático del suelo, modelo de Van Genuchten, hipoxia radicular, drenaje agrícola.

### ABSTRACT

In tropical inter-Andean valleys, soils with high fertility potential often exhibit severe physical, chemical, and consequently biological limitations. This study characterized the dynamics and water storage of a soil with redoximorphic features in the Cauca Valley (Colombia) to understand the restrictions of its structural threshold under endosaturation conditions. Stratigraphy, clay mineralogy (XRD), water retention (Van Genuchten model), phreatic-piezometric dynamics, and saturated hydraulic conductivity (KSat) were evaluated under bimodal rainfall. The results show an abrupt transition: a clay surface epipedon (0-60 cm), dominated by expansive chlorites that induce sealing, overlain by a subsurface horizon composed of sandy deposits. The Van Genuchten model showed high porosity at saturation ( $\theta_s = 0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), but a critically narrow available water layer ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). The hydroperiod revealed rapid rises in the water table under antraquial conditions in the first 40 cm, collapsing the KSat. This confirms a "hydromorphic paradox," where the chemical potential is restricted by rapid root asphyxiation. In conclusion, agronomic management inevitably requires the implementation of subsurface drainage to unlock productivity.

**Keywords:** Soil-water dynamics, water table, Van Genuchten model, root hypoxia, agricultural drainage.

## INTRODUCCIÓN

Los valles interandinos tropicales, particularmente el Valle Geográfico del río Cauca en Colombia, representan zonas de alta importancia agrícola debido a la génesis de sus suelos sobre abanicos y terrazas aluviales de materiales finos. En estas regiones, la interacción entre una geomorfología de relieves planos a plano-cóncavos y un régimen de precipitación bimodal condiciona la presencia de suelos con régimen de humedad ácuico (IGAC-CVC, 2021; Malagón Castro, 2003). Estos sistemas, clasificados taxonómicamente bajo el suborden de los *Aqualf*, presentan procesos patogenéticos dominados por la lixiviación de arcillas y la segregación de óxidos, lo que deriva en la formación de horizontes argílicos con severas restricciones al drenaje interno (Soil Survey Staff, 2014).

A pesar de que estos suelos suelen ser catalogados como de alta fertilidad química, debido a su elevada saturación de bases y pH cercanos a la neutralidad, en la práctica agrícola emerge la denominada “paradoja del hidromorfismo”. Esta se manifiesta cuando el potencial productivo se ve truncado no por la disponibilidad de nutrientes, sino por limitaciones físicas estructurales que afectan el intercambio gaseoso en la rizosfera (Chen et al., 2024). El fenómeno de la gleización, evidenciado por rasgos redoximórficos (moteaduras y empobrecimientos cromáticos), no es solo un indicador de saturación temporal, sino el reflejo de una dinámica hidro-estructural compleja donde la conductividad hidráulica saturada ( $K_{Sat}$ ) se ve comprometida por la disposición de la matriz arcillosa en presencia de arcillas tipo 2:1 y 1:1, como cloritas y caolinitas, seguida en profundidad por una matriz arenosa constituida de cuarzo, granos alterados y fragmentos líticos en

más del 70% bajo condiciones de saturación (Marín-Pimentel et al., 2023).

Las investigaciones previas en estos ambientes se han centrado mayoritariamente en la respuesta agronómica de cultivos de ciclo corto o perennes, relegando a un segundo plano la caracterización profunda de la física del suelo como un sistema dinámico (Cruz V & Arias, 2015; FEDECACAO, 2015). Existe un vacío de conocimiento respecto a cómo el “umbral estructural”, entendido como el punto crítico donde la porosidad de aireación desciende por debajo del límite biológico funcional, fluctúa en respuesta a la oscilación intraanual del nivel freático en suelos *Mollic Endoaqualf* y *Udic Haplustert*. En estos suelos, la superposición de capas texturalmente contrastantes puede configurar sistemas parcialmente confinados, donde el almacenamiento hídrico no depende únicamente de la capacidad de campo teórica, sino de la presión de poros y el flujo preferencial (Chen et al., 2024; Pollacco, 2008).

La gestión sostenible de estos suelos requiere una comprensión detallada de su comportamiento hidrofísico para evitar procesos de degradación por sellado o compactación inducida bajo condiciones de exceso de humedad (Buriticá et al., 2025). Por lo tanto, el presente estudio se fundamenta en la necesidad de caracterizar la arquitectura del perfil y su dinámica freática con implicaciones al sistema productivo agrícola. El objetivo principal es determinar la relación entre las propiedades hidrofísicas y la variabilidad del nivel freático, evaluando cómo la composición mineralógica y la configuración morfológica del perfil definen el umbral de almacenamiento hídrico y las limitaciones de aireación en un contexto de variabilidad climática interandina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Localización y condiciones agroclimáticas.

La investigación se llevó a cabo en una unidad experimental de 3600 m<sup>2</sup> ubicada en la granja de la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao), Valle del Cauca (04°10'33.97" N; 76°12'19.90" W), a una altitud de 950 msnm. El área se sitúa en una terraza aluvial de relieve plano (pendiente < 2%), bajo un clima cálido seco con precipitación media de 1177 mm anuales y régimen bimodal, con picos de lluvia en los periodos marzo-mayo y septiembre-noviembre (Trujillo-Obando et al., 2023).

### 2.2 Caracterización pedológica y mineralógica.

En la taxonomía del suelo se reconoció como *Mollic Endoaqualf*, caracterizado por un régimen de humedad altamente variable udico-ácuico y condiciones de hidromorfismo subsuperficial. La caracterización morfológica se realizó mediante una calicata de 2.0 x 2.0 x 1.5 m, siguiendo los protocolos del Soil Survey Staff (2014) manual para la descripción de horizontes, color (tablas Munsell), estructura y rasgos redoximórficos. La composición mineralógica de la fracción arcilla se determinó mediante Difracción de Rayos X (DRX) en muestras orientadas, identificando la presencia de cloritas y caolinitas que condicionan el comportamiento hidro-estructural del perfil (IGAC, 2006).

### 2.3 Propiedades hidrofísicas y modelo de retención.

Se colectaron muestras disturbadas y núcleos de volumen conocido en cada horizonte genético para determinar la granulometría (método del hidrómetro de Bouyoucos), densidad aparente (método del cilindro), densidad real (picnómetro) y porosidad total (Tabla 1). Se determinó el contenido de agua

volumétrico ( $\theta$ ) a diferentes tensiones (0.1, 0.3, 1, 3, 5, 10 y 15 bar) utilizando ollas y platos de presión. Los datos se ajustaron al modelo de Van Genuchten (1980) mediante la ecuación:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son los contenidos de agua saturado y residual, y  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  son parámetros de ajuste de la forma de la curva.

### 2.4 Monitoreo de la dinámica freática y variabilidad estratigráfica.

Para comprender la arquitectura subsuperficial que condiciona el drenaje, se realizó un levantamiento estratigráfico en 9 puntos distribuidos espacialmente en el lote, mediante barrenadas hasta 100 cm de profundidad. En cada punto se describió la transición textural, el color y la presencia de rasgos redoximórficos. Complementariamente, se determinó la conductividad hidráulica saturada ( $K_{\text{Sat}}$ ) in situ en estos puntos para establecer la permeabilidad de la matriz del suelo (CENICAÑA, 1995). La fluctuación del nivel freático se monitoreó mediante cuatro baterías piezométricas con tubos de PVC a 40, 80 y 120 cm de profundidad, cuyas lecturas semanales se correlacionaron con la precipitación *in situ* (estación Campbell Scientific).

### 2.5 Análisis de datos y soporte estadístico.

El comportamiento hidro-estructural se modeló ajustando los datos de retención de humedad al modelo de (Van Genuchten, 1980). La variabilidad espacial de la estratigrafía y la  $K_{\text{Sat}}$  se analizaron mediante estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) para identificar la heterogeneidad del perfil, mientras que la dinámica freática se evaluó mediante un análisis descriptivo temporal de la variabilidad freática en respuesta a los pulsos pluviométricos del régimen bimodal.

**Tabla 1.** Propiedades del suelo, parcela experimental FEDECACAO.

Variables	Unidades	0–20 cm	20–40 cm
Propiedades Físicas			
Densidad Aparente (DA)	g cm <sup>-3</sup>	1.15	1.12
Densidad Real (DR)	g cm <sup>-3</sup>	2.54	2.54
Porosidad Total (n)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.55	0.56
Capacidad de Campo (CC)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.36	0.35
Punto de Marchitez Permanente (PWP)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.26	0.26
Agua aprovechable (AWC)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.1	0.09
Textural Class	–	FARL	ArL
Propiedades Químicas			
pH	–	6.54	6.91
Conductividad Eléctrica (CE)	dS m <sup>-1</sup>	0.21	0.15
Materia Orgánica (MO)	%	2.11	1.4
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	%	0.32	0.43
Saturación de bases	%	90.95	>95
Fosforo (P)	mg kg <sup>-1</sup>	19.71	13.56
Potasio (K <sup>+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	0.39	0.43
Sodio (Na <sup>+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	0.1	0.12
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	15.81	15.25
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	11.83	14.74
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>	30.93	28.16
Azufre (S)	mg kg <sup>-1</sup>	25.9	Nd
Boro (B)	mg kg <sup>-1</sup>	1.16	Nd
Cobre (Cu)	mg kg <sup>-1</sup>	21.39	Nd
Manganeso (Mn)	mg kg <sup>-1</sup>	66.16	Nd
Hierro (Fe)	mg kg <sup>-1</sup>	65.74	Nd
Zinc (Zn)	mg kg <sup>-1</sup>	3.25	Nd

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Arquitectura estratigráfica y pedología.

La génesis del perfil evaluado evidencia una alta heterogeneidad litológica espacial, característica inherente a los depósitos aluviales del Valle del Cauca (IGAC, 2004; Malagón, 2006). El levantamiento estratigráfico (Figura 1) reveló una transición textural abrupta que define el comportamiento

hidrodinámico del sistema. En los primeros 30 cm dominan texturas finas (arcillosas a arcillo-limosas), las cuales transicionan hacia materiales franco-arcillosos (30-40 cm) y franco-arcillo-arenosos (40-60 cm), hasta interceptar depósitos de arena a partir de los 60-70 cm de profundidad. Esta superposición de estratos contrastantes explica la severidad del régimen transicional udico al ácuico diagnosticado. La presencia de un lecho arenoso subyacente a una matriz arcillosa

genera un rompimiento de la capilaridad y una marcada anisotropía vertical, limitando la percolación profunda y favoreciendo la formación de un nivel freático colgado temporal. Esta dinámica reductiva es consistente con

los hallazgos de Michael J. Vepraskas et al. (2006) en suelos hidromórficos, y se confirma mediante la presencia de matrices 10YR4/2 y 10YR5/3, acompañadas de gleización y moteados en los horizontes Btg y Bg.

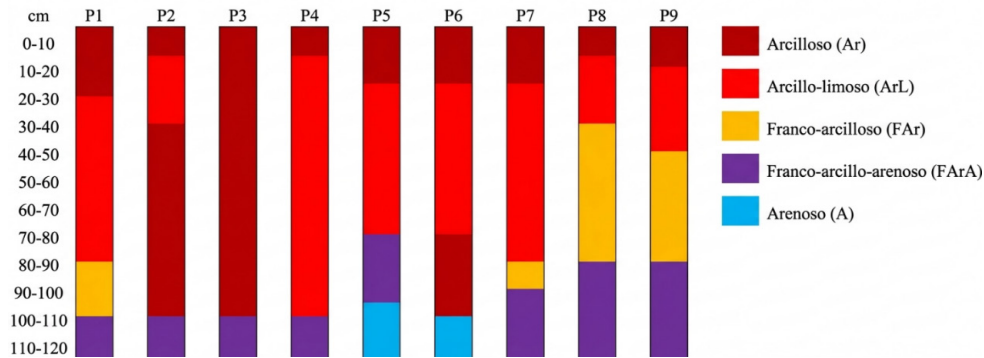


Figura 1. Distribución vertical de características por perfil (P1–P9)

Desde la perspectiva mineralógica, aunque el esqueleto del suelo cuenta con un 38% de cuarzo en la fracción arena, el comportamiento hidro-estructural está gobernado por la fracción arcilla. El análisis de difracción de rayos X (DRX) indicó un dominio absoluto de cloritas (tipo 2:1:1) seguido de caolinitas (tipo 1:1). La predominancia de cloritas justifica la alta capacidad de intercambio catiónico ( $30.93 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ ) observada. Sin embargo,

tal como lo reportan autores como Dixon & Weed (1989) para arcillas con componentes expansivos, esta mineralogía promueve un severo sellamiento estructural bajo condiciones de saturación. Este fenómeno explica las bajas tasas de conductividad hidráulica saturada ( $K_{\text{Sat}}$ ) registradas *in situ* (Figura 2) y la ineficiencia del sistema para evacuar los excesos hídricos gravitacionales tras los eventos de precipitación.

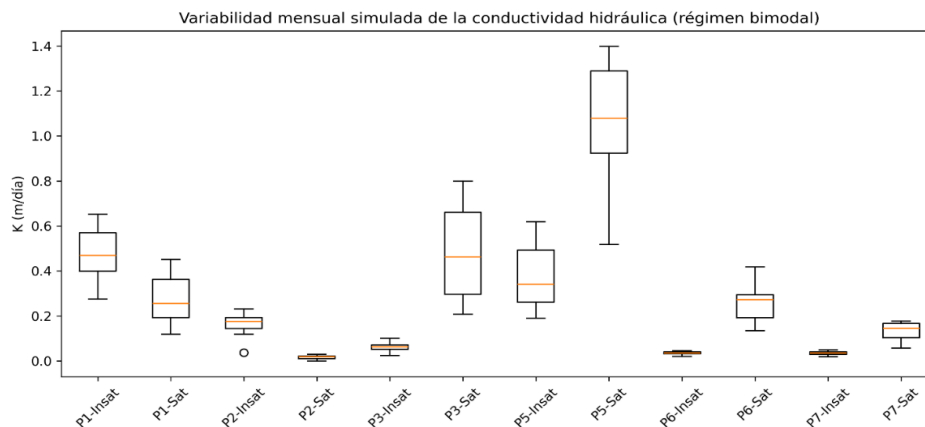


Figura 2. Variabilidad mensual de la conductividad hidráulica saturada (régimen bimodal)

### 3.2 Retención hídrica y caracterización del umbral estructural.

La dinámica de retención hídrica en el horizonte superficial (Figura 3) evidencia

físicamente la “paradoja hidromórfica” del perfil. El ajuste de la curva de desorción al modelo de Van Genuchten (1980) para el horizonte superficial arrojó un contenido de

humedad a saturación ( $\theta_s$ ) de  $0.596 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Aunque este alto volumen poroso total sugiere teóricamente un ambiente físico favorable, los parámetros de forma de la curva ( $n = 2.4256$  y  $m = 0.0459$ ) y el valor de entrada de aire ( $\alpha = 0.6253 \text{ cm}^{-1}$ ) revelan

un comportamiento hidrodinámico restrictivo. Estos índices indican un vaciado rápido de la escasa macroporosidad estructural a bajas tensiones, seguido de una retención hídrica severa gobernada por la matriz microporosa.

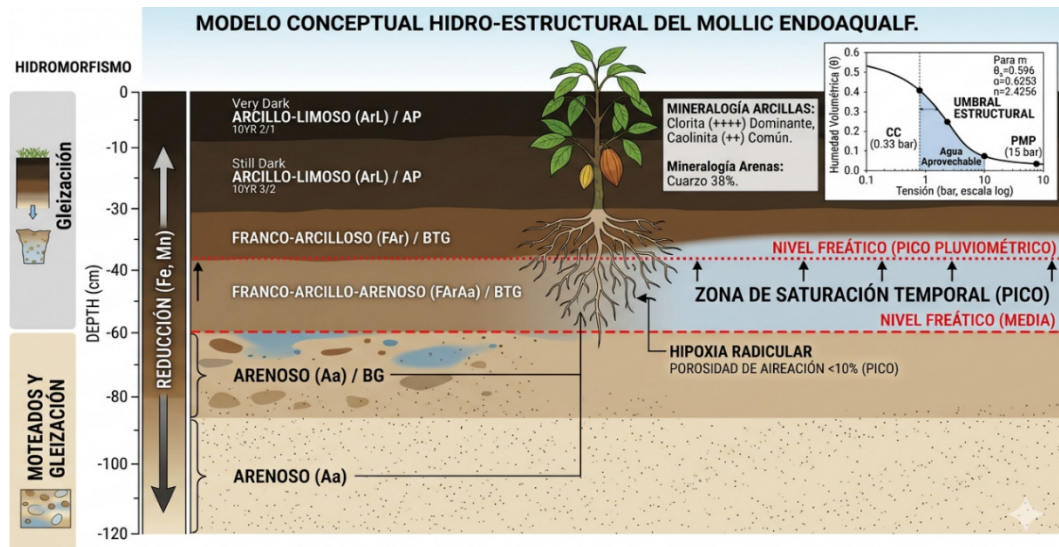


Figura 3. Modelo conceptual hidro-estructural del suelo

En términos funcionales, el suelo retiene  $0.4036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a capacidad de campo ( $0.33 \text{ bar}$ ) y  $0.2217 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en el punto de marchitez permanente ( $15 \text{ bar}$ ), configurando una lámina de agua aprovechable sumamente estrecha ( $0.1819 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Este reducido margen define el umbral estructural del *Mollic Endoaqualf*. A pesar de su alta porosidad total, el acomodo laminar de las cloritas y la dominancia de microporos provocan que, ante lluvias moderadas, la porosidad de aireación descienda rápidamente por debajo del límite crítico del 10% (Grable & Siemer, 1968; Rabot et al., 2018), induciendo condiciones de hipoxia radicular mucho antes de que el nivel freático aflore a la superficie. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Reynolds et al. (2002) y Dexter (2004) para suelos con texturas finas y arcillas de alta actividad, donde la calidad física se ve comprometida por una distribución porosa desbalanceada. La fuerte retención de humedad a tensiones altas ( $>15 \text{ bar}$ ) ratifica la influencia de la vasta superficie

específica de las arcillas tipo 2:1 reportadas en la mineralogía. En consecuencia, durante los periodos de transición climática, las raíces deben ejercer un gasto energético excesivo para la absorción hídrica o, por el contrario, enfrentarse a una rápida asfixia, lo que limita severamente la expresión del alto potencial químico (fertilidad) del suelo.

### 3.3 Dinámica freática, conductividad hidráulica y respuesta climática.

La interacción entre el régimen pluviométrico bimodal y la arquitectura restrictiva del perfil determina el hidroperiodo del suelo. El monitoreo piezométrico continuo evidenció un sistema hidrodinámico altamente sensible a los pulsos de precipitación. Durante los periodos de transición y baja precipitación, el nivel freático base se estabiliza a una profundidad de entre 60 y 80 cm, sostenido por el acuífero libre que descansa sobre los depósitos arenosos subyacentes ( $>100$

cm). Sin embargo, durante los picos del régimen bimodal (marzo-mayo y septiembre-noviembre), se registra un ascenso abrupto del nivel freático, el cual intercepta sistemáticamente los piezómetros de 40 cm, saturando la zona de mayor actividad biológica radicular.

Este comportamiento de “ascenso rápido y abatimiento lento” está intrínsecamente ligado a la permeabilidad de la matriz del suelo. La evaluación de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{Sat}$ ) *in situ* a través de los meses demuestra que la capacidad de transmisión de agua del suelo colapsa bajo regímenes continuos de lluvia. Los bajos valores de  $K_{Sat}$  (que descendieron drásticamente de 58 mm/h en periodos de transición a prácticamente 0 mm/h en la época lluviosa máxima) en los primeros 40 cm (horizontes Ap y Btg) actúan como un cuello de botella hidráulico: la tasa de infiltración de las precipitaciones supera la capacidad de percolación profunda del perfil, generando la recarga instantánea de los macroporos que ya venían limitados, tal como se demostró en el modelo de Van Genuchten. Desde una perspectiva edafológica, este escenario configura un hidropedón de anaerobiosis prolongada. Autores como Faulkner y Patrick (1992) y M. J. Vepraskas et al. (2006) señalan que en suelos con horizontes argílicos (tipo *Aqualfs*), la oscilación freática somera no solo inhibe el intercambio de oxígeno, sino que altera termodinámicamente el suelo, desencadenando la reducción de hierro y manganeso (gleización). En la práctica, el umbral estructural del suelo es vulnerado; el drenaje natural es insuficiente para evacuar la lámina gravitacional en un tiempo biológicamente seguro (<48 horas), lo que explica por qué el alto potencial químico del suelo (fertilidad) no se traduce en productividad sostenida sin una intervención mecanizada de drenaje subsuperficial.

## CONCLUSIONES

La evaluación del suelo *Mollic Endoaqualf* confirma una “paradoja hidromórfica” en la terraza aluvial: a pesar de su excepcional potencial de fertilidad, su aptitud productiva está severamente restringida por una estratigrafía contrastante y una mineralogía dominada por cloritas expansivas. Esta configuración define un “umbral estructural” críticamente estrecho; aunque la porosidad total supera el 50%, la lámina de agua aprovechable es mínima, induciendo un agotamiento rápido del oxígeno en el suelo antes de que el nivel freático siquiera alcance la superficie.

Bajo el régimen pluviométrico bimodal interandino, el ascenso freático acelerado y el colapso de la conductividad hidráulica ( $K_{Sat}$ ) imponen un estrés fisiológico severo para especies perennes de sistema radicular sensible a la hipoxia, como el cacao (*Theobroma cacao* L.). Para viabilizar este tipo de sistemas productivos, la oscilación abrupta entre la saturación asfixiante y el déficit hídrico hace ineludible priorizar la implementación de drenaje subsuperficial y el manejo físico de la macroporosidad, por encima de los planes de fertilización tradicional.

## REFERENCIAS

- Buriticá, F., Vanegas, J. I. & Suárez, J. C. (2025). Influence of Soil Physical and Hydraulic Properties on Cacao Productivity Under Agroforestry Systems in the Amazonian Piedmont. *Agriculture (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/agriculture15181973>
- CENICAÑA. (1995). *El cultivo de la Caña en la zona Azucarera de Colombia* (C. Cassalet, J. Torres, & C. Echeverry, Eds.). [https://www.cenicana.org/pdf\\_privado/documentos\\_no\\_seriados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p3-394.pdf](https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf)

- Chen, S., Wang, C., Shang, S., Mao, X. & Zhao, J. (2024). Dynamic and empirical methods for field capacity estimation in fine textured soils with a coarse interlayer. *Geoderma*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117000>
- Cruz V, J. R. & Arias, Á. J. (2015). *Manejo eficiente del uso de la caña de azúcar* (Cenicafía, Ed.; 1st ed.). errtytuiu
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dixon, J. B. & Weed, S. B. (1989). *Minerals in Soil Environments* (Soil Science Society of America, Ed.; 2nd ed.).
- Faulkner, S. P. & Patrick, W. H. (1992). Redox processes and diagnostic wetland soil indicators in bottomland hardwood forests. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 856–865. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030030x>
- FEDECACAO. (2015). *Guía técnica para el cultivo del cacao: Sexta edición*. <https://es.scribd.com/document/426619713/FEDECACAO-GUIA-TECNICA-2015-1-pdf>
- Grable, A. R. & Siemer, E. G. (1968). Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, 32(2), 180–186.
- IGAC. (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca*.
- IGAC. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” Subdirección Agrológica, Ed.; 6a ed).
- IGAC-CVC. (2021). *Levantamiento semidetallado de suelos del departamento del Valle del Cauca: escala 1:25.000*.
- Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos Colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *ACAD*, 27(104), 319–342. [https://www.accefyn.com/revista/Vol\\_27/104/319-341.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Vol_27/104/319-341.pdf)
- Malagón, D. (2006). *Suelos de Colombia: Composición, génesis, clasificación y manejo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Universidad Nacional de Colombia.
- Marín-Pimentel, G. E., Rueda-Saa, G. & Menjivar-Flores, J. C. (2023). Evaluation of physicochemical properties in agricultural soils on the flat and piedmont areas of Valle del Cauca, Colombia with emphasis on degradation. *Environmental Earth Sciences*, 82(157), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10813-6>
- Pollacco, J. A. P. (2008). A generally applicable pedotransfer function that estimates field capacity and permanent wilting point from soil texture and bulk density. *Canadian Journal of Soil Science*, 8, 761–774. [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S. & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(2). [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (USDA-Natural Resources Conservation Service (NRCS), Ed.; 12th ed.).

Trujillo-Obando, Ó. E., Escobar, J. A. D. & Torres, E. A. (2023). Socio-economic aspects associated with water management in cocoa cultivation in Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 72(4), 368–376. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n4.113615>

Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Vepraskas, M. J., Richardson, J. L. & Tandarich, J. P. (2006). Dynamics of redoximorphic feature formation under controlled ponding in a created riverine wetland. *Wetlands*, 26(2), 486–496. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[486:DORFFU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[486:DORFFU]2.0.CO;2)