

# Evaluation of structural stability and consistency as indicators of soil health in contrasting production systems at Zamorano University

Darla Stefania Valarezo Carapaz <sup>1</sup>; Ricardo Alexander Peña Venegas <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Zamorano, Honduras, [darla.valarezo@est.zamorano.edu](mailto:darla.valarezo@est.zamorano.edu), [rpena@zamorano.edu](mailto:rpena@zamorano.edu)

*Abstract– Soil health is key to agricultural production and environmental sustainability, as its physical properties influence water retention, structural stability, and nutrient availability. Agricultural management modifies these characteristics and determines soil resilience to erosion and climate change. This study evaluated soils under different management systems at the Zamorano Pan-American Agricultural School, Honduras, through field and laboratory measurements. Key soil health indicators were established by comparing their physical properties. The characterization of structural stability provided information to optimize sustainable agricultural practices in the region.*

*Keywords: soil quality, soil structure, management, aggregate stability, Atterberg limits.*

# Evaluación de la estabilidad estructural y la consistencia como indicadores de salud del suelo en sistemas de producción contrastantes en la Universidad Zamorano

Darla Stefania Valarezo Carapaz<sup>1</sup>; Ricardo Alexander Peña Venegas<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Zamorano, Honduras, [darla.valarezo@est.zamorano.edu](mailto:darla.valarezo@est.zamorano.edu), [rpena@zamorano.edu](mailto:rpena@zamorano.edu)

**Resumen**– La salud del suelo es clave para la producción agropecuaria y la sostenibilidad ambiental, ya que sus propiedades físicas influyen en la retención de agua, la estabilidad estructural y la disponibilidad de nutrientes. El manejo agrícola modifica estas características y condiciona la resiliencia del suelo frente a la erosión y al cambio climático. Esta investigación evaluó suelos bajo distintos sistemas de manejo en la Universidad Zamorano, Honduras, mediante mediciones de campo y laboratorio. Se establecieron indicadores clave de salud del suelo al comparar sus propiedades físicas. La caracterización de su estabilidad estructural aportó información para optimizar prácticas agrícolas sostenibles en la región.

**Palabras**– clave salud del suelo, estructura edáfica, manejo, estabilidad de agregados, límites de Atterberg

## I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural finito y no renovable, esencial para la producción agropecuaria y la provisión de servicios ecosistémicos [1]. Su funcionalidad ecológica fortalece la resiliencia frente a eventos climáticos extremos y puede mejorarse mediante estrategias de manejo sostenible que favorecen el secuestro de carbono y la restauración de ecosistemas degradados [2]. El aumento del carbono orgánico del suelo contribuye a mejorar sus propiedades físicas, consideradas indicadores clave de salud y resiliencia edáfica frente a la variabilidad climática [3]. La salud física del suelo agrícola se define como su capacidad para mantener una estructura funcional que favorezca el desarrollo radicular y el intercambio eficiente de agua, aire y nutrientes [4]. Estas propiedades son determinantes para la productividad de los cultivos y la mitigación de impactos ambientales asociados a la agricultura intensiva [5]. Su evaluación se basa en indicadores como la estabilidad estructural, la densidad aparente, la porosidad y la consistencia, que permiten orientar decisiones de manejo sostenible [6]. La estabilidad estructural del suelo depende de la formación y resistencia de los agregados, resultado de la interacción entre fracciones minerales y materia orgánica [7]. Esta estabilidad se relaciona con la infiltración, retención de agua y resistencia a la erosión [8]. Adicionalmente, se ha observado que una mayor estabilidad estructural favorece el almacenamiento y movimiento del agua en el perfil edáfico, siendo crucial para mantener la productividad en escenarios de variabilidad climática [9]. el método de tamizado en húmedo propuesto por Yoder [10]. Es una de las técnicas más utilizadas para evaluar la estabilidad estructural del suelo, ya que simula la desagregación natural causada por la lluvia o el riego

mediante la inmersión y agitación de agregados en una serie de tamices, permitiendo calcular indicadores como el Diámetro Medio Ponderado (DMP) y el porcentaje de agregados estables al agua (WSA). Un mayor DMP se asocia con mayor resiliencia estructural y mejor retención e infiltración de agua [3]. mientras que su aplicación en distintos suelos ha evidenciado mayor estabilidad en aquellos con alto contenido de arcilla y materia orgánica [11]. La consistencia del suelo es una propiedad física que describe su resistencia a fuerzas externas, como la presión o la deformación, en función de su contenido de humedad. Esta característica resulta fundamental para comprender el comportamiento mecánico de suelos de textura fina, ya que influye directamente en parámetros como la cohesión, la plasticidad y la estabilidad estructural. Dichas propiedades están determinadas por la textura, el contenido de arcilla y la fracción orgánica presente en el suelo [12]. En este contexto, los límites de Atterberg, el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), permiten cuantificar la consistencia del suelo en función de su contenido de humedad [13]. Asimismo, ayudan a determinar el índice de plasticidad, información útil para la planificación agrícola y la prevención de compactación [14]. El presente estudio se fundamenta en la necesidad de establecer una línea base de indicadores físicos de salud edáfica en Centroamérica mediante la evaluación de parámetros como la estabilidad estructural y los límites de consistencia en distintos sistemas de manejo.

Los resultados aportan información relevante para formular estrategias de manejo sustentable orientadas a optimizar el desempeño del suelo, facilitar la toma de decisiones agronómicas y promover la adopción de prácticas regenerativas. En este marco, el objetivo general de la investigación fue evaluar la estabilidad estructural y la consistencia como indicadores de salud del suelo en sistemas de producción contrastantes, a través de dos objetivos específicos: (i) Caracterizar la estabilidad estructural del suelo mediante indicadores como el Diámetro Medio Ponderado (DMP) y el porcentaje de agregados estables al agua (WSA), en sistemas con distintos tipos de manejo agrícola y (ii) Analizar el índice de plasticidad del suelo, calculado a partir de los límites líquido y plástico, en sistemas de manejo contrastantes, para interpretar su influencia sobre la cohesión, la resistencia mecánica y la susceptibilidad a la degradación estructural.

## II. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en una región tropical subhúmeda de Honduras (800 msnm; 27 °C de temperatura media anual; 1 100 mm de precipitación anual), clasificada como bosque seco tropical. Se evaluaron cinco sistemas de manejo contrastantes: bosque (testigo), manejo convencional, frutales, pasturas y agricultura orgánica.

La investigación se desarrolló bajo un diseño cuasiexperimental, en el cual los sistemas de manejo se consideraron como tratamientos no aleatorizados debido a sus condiciones preexistentes en campo. En cada sistema se seleccionaron puntos de muestreo de forma aleatoria como repeticiones experimentales, con el fin de capturar la variabilidad interna. Este enfoque permite analizar sistemas bajo condiciones reales de manejo, favoreciendo la comparabilidad entre escenarios productivos contrastantes.

#### A. Muestreo de suelos

En cada punto de muestreo se recolectaron muestras de suelo indisturbadas de aproximadamente 1 kg a una profundidad de 0–20 cm, previa remoción de residuos vegetales superficiales. En total se obtuvieron 15 muestras, correspondientes a cinco sistemas de manejo, con tres repeticiones por sistema. Aunque el tamaño de muestra es relativamente limitado, se consideró adecuado para realizar comparaciones exploratorias entre sistemas contrastantes y capturar la variabilidad intrínseca de cada condición de manejo. Las muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas debidamente identificadas y conservadas en condiciones frescas hasta su procesamiento en laboratorio.

#### B. Mediciones

1) Estabilidad estructural: se determinó mediante tamizado en húmedo (método de Yoder) [15]. El diámetro medio ponderado (DMP) se calculó mediante

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{EE_i \cdot \bar{x}_i}{100}, \quad (1)$$

donde  $EE_i$  es el porcentaje en peso de agregados retenidos y  $\bar{x}_i$  el diámetro medio de cada fracción.

Los valores de DMP se clasificaron según los criterios establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi [16], como se muestra en la Tabla 1.

TABLA I  
CLASIFICACIÓN DEL DIÁMETRO MEDIO PONDERADO (DMP)

| DMP (mm)  | Estabilidad estructural |
|-----------|-------------------------|
| < 0,5     | Inestable               |
| 0,5 – 1,5 | Ligeramente estable     |
| 1,5 – 3,0 | Moderadamente estable   |
| 3,0 – 5,0 | Estable                 |
| > 5,0     | Muy estable             |

El estado de agregación (EA) se determinó como indicador complementario de estabilidad estructural [10], mediante

$$EA = 100 - \sum_{i=1}^n \frac{MSSR_i \cdot 100}{MSS}, \quad (2)$$

donde  $MSSR_i$  es la masa de agregados retenidos en cada tamiz y  $MSS$  es la masa total de suelo seco.

2) Límites de consistencia: se determinaron mediante el método de Casagrande para el límite líquido (LL) y el método del hilo de 3 mm para el límite plástico (LP) [16].

El límite líquido se calculó mediante

$$LL = \frac{M_{shc} - M_{ssc}}{M_{ssc} - M_c} \times 100, \quad (3)$$

El límite plástico se determinó como

$$LP = \frac{M_{shc} - M_{ssc}}{M_{ssc} - M_c} \times 100, \quad (4)$$

donde  $M_{shc}$  es la masa del suelo húmedo más cápsula,  $M_{ssc}$  la masa del suelo seco más cápsula y  $M_c$  la masa de la cápsula.

El índice de plasticidad (IP) se calculó como

$$IP = LL - LP. \quad (5)$$

donde LL corresponde al límite líquido (%) y LP al límite plástico (%), ambos expresados en contenido de humedad.

La interpretación del índice de plasticidad se realizó conforme a los criterios establecidos en [16], los cuales se presentan en la Tabla 2.

TABLA II  
INTERPRETACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)

| Índice de Plasticidad (IP) | Calificación | Interpretación                                                                                                                                       |
|----------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| < 10                       | Bajo         | Suelos poco plásticos, no cohesivos y erosionables. Generalmente bajos en arcilla y difíciles de mecanizar si no se manejan con la humedad adecuada. |
| 10 – 20                    | Medio        | Suelos con plasticidad moderada y mezcla equilibrada de arcilla, limo y arena. Favorecen la estabilidad, cohesión y facilidad de labranza.           |
| > 20                       | Alto         | Suelos muy plásticos, cohesivos, altos en arcilla y de difícil mecanización; pueden ser erosionables bajo ciertas condiciones.                       |

#### C. Caracterización de lotes contrastantes

Se evaluaron cinco sistemas de manejo con antecedentes productivos diferenciados.

El bosque natural corresponde a una franja de vegetación riparia establecida a inicios de la década de 1990, asociada a un sistema de lagunas de tratamiento de aguas residuales. Funciona como corredor biológico y ha permanecido sin uso agrícola por más de 25 años, favoreciendo la conectividad ecológica y la estabilidad ambiental (O. Komar, comunicación personal, 6 de marzo de 2025).

El sistema de manejo convencional ha sido utilizado con fines de enseñanza agrícola, evolucionando de monocultivos (caña de azúcar, frijol, maíz y sorgo) hacia rotaciones diversificadas de cultivos de ciclo corto como ajonjolí, girasol, maíz, sorgo, soya, frijol, maní y arroz. Se emplea mecanización periódica, sin programas sistemáticos de fertilización química (R. Pineda, comunicación personal, 15 de marzo de 2025).

El lote de frutales presenta aproximadamente 15 años bajo un sistema perenne. Antes de su establecimiento se realizó preparación mecánica con rastras pesadas y livianas, y durante el ciclo productivo se aplican labores manuales según criterios técnicos de manejo (A. Padilla, comunicación personal, 25 de marzo de 2025).

El sistema de agricultura orgánica mantiene cerca de 15 años sin uso de insumos sintéticos. En los últimos años se establecieron yuca, mucuna y maíz, con mecanización superficial (0–10 cm) únicamente en cultivos de raíz. Actualmente registra 1,5 años sin mecanización (R. Ulloa, comunicación personal, 9 de abril de 2025).

Las pasturas cultivadas han sido manejadas bajo pastoreo racional intensivo durante los últimos dos años, con antecedentes de pastoreo rotacional. La cobertura incluye Tanzania (*Panicum maximum*), Mombasa (*Megathyrus maximus*), Estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y *Brachiaria* spp., buscando mejorar la productividad forrajera y la cobertura del suelo (C. Campos, comunicación personal, 2 de junio de 2025).

Adicionalmente, se efectuó un análisis de correlación de Pearson ( $p < 0.05$ ) entre los indicadores evaluados y propiedades físicas del suelo previamente reportadas en [17], incluyendo carbono orgánico, densidad aparente, densidad real, porosidad total y fracciones texturales, con el propósito de fortalecer la interpretación integral de los resultados.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Estabilidad estructural del suelo

Los resultados mostraron un efecto significativo del sistema de manejo sobre la estabilidad estructural del suelo, evaluada mediante el diámetro medio ponderado (DMP) y el estado de agregación (EA) (Fig. 1). Los valores de ambos indicadores fueron mayores en los sistemas con cobertura permanente (bosque, frutales y pasturas), en comparación con los sistemas convencional y orgánico (Fig. 1a y Fig. 1b).

Estos resultados indican una mayor estabilidad estructural y resistencia a la disgregación en suelos con menor perturbación. En contraste, el manejo convencional presentó menores valores de DMP, lo que evidencia fragmentación de agregados y pérdida de integridad estructural [18]. Este

comportamiento ha sido asociado a la labranza intensiva y a la reducción del contenido de materia orgánica [19].

La mayor estabilidad observada en sistemas con cobertura vegetal concuerda con estudios previos que identifican al DMP como un indicador sensible del estado físico del suelo y su respuesta al manejo [20]. En este sentido, prácticas orientadas a reducir la perturbación y mantener cobertura vegetal favorecen la conservación de la estructura del suelo.

Asimismo, la mayor agregación estructural se relaciona con una mayor capacidad de estabilización del carbono orgánico, lo que contribuye a la resiliencia del suelo frente a procesos de degradación [21].

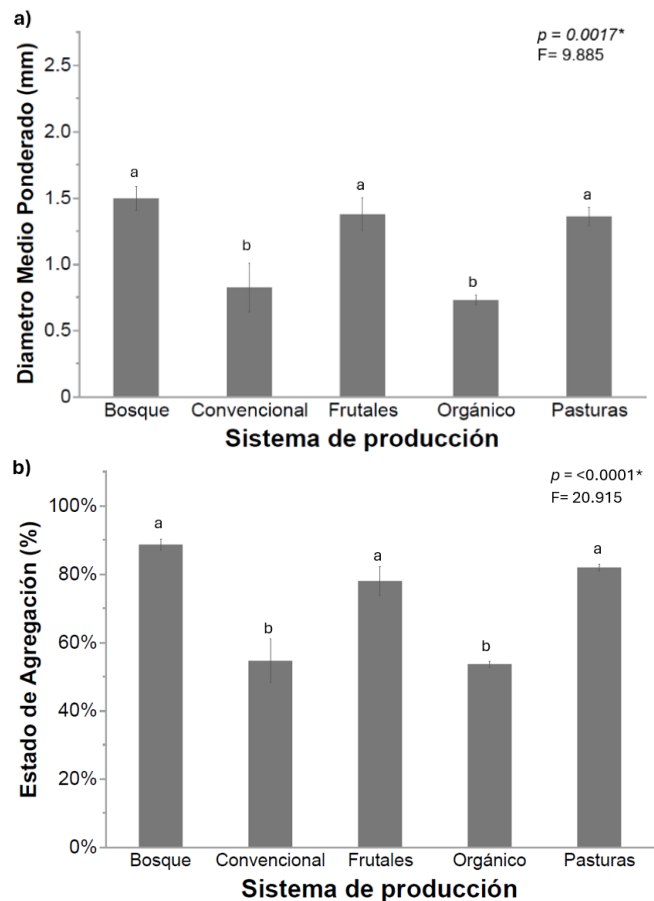


Fig. 1 Caracterización de diámetro medio ponderado en agua y estado de agregación en cinco usos de suelo contrastantes. Diámetro Medio Ponderado (mm) y Estado de Agregación (%). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.

#### B. Límites de consistencia del suelo

Los resultados evidenciaron un efecto significativo del uso del suelo sobre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), sin diferencias en el índice de plasticidad (IP) (Fig. 2). El LL fue mayor en el sistema forestal en comparación con el sistema

convencional, mientras que los demás sistemas no mostraron diferencias significativas entre sí (Fig. 2a).

Este comportamiento sugiere que los suelos con cobertura permanente presentan mayor capacidad de retención de humedad y mejor estabilidad estructural, asociadas a un mayor contenido de materia orgánica. Estos resultados coinciden con lo reportado por [22], quienes destacan la influencia de la materia orgánica en la consistencia del suelo.

El LP mostró valores más altos en el sistema forestal, con diferencias respecto al manejo convencional, aunque similares a pasturas (Fig. 2b). Esto indica una mayor cohesión en sistemas con menor intensidad de manejo, lo cual puede estar relacionado con mayor contenido de arcilla activa y materia orgánica [23].

En concordancia, estudios previos reportan que suelos bajo cobertura forestal presentan mayor plasticidad y cohesión en comparación con sistemas agrícolas intensivos [24].

El índice de plasticidad (IP) clasificó los suelos como ligeramente plásticos en la mayoría de los sistemas, y moderadamente plástico en frutales (Fig. 2c), lo que sugiere diferencias en su comportamiento mecánico y susceptibilidad a la degradación.

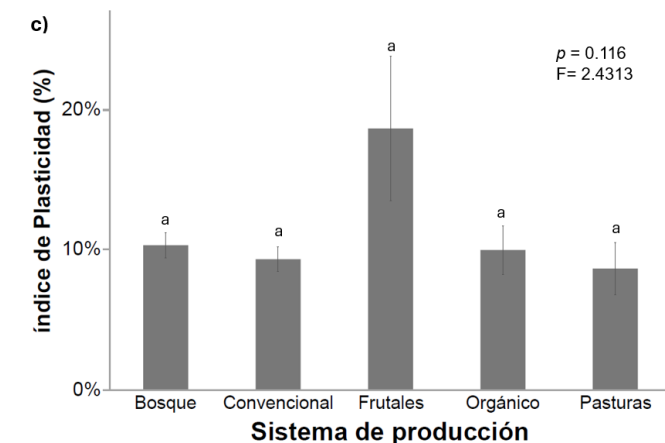
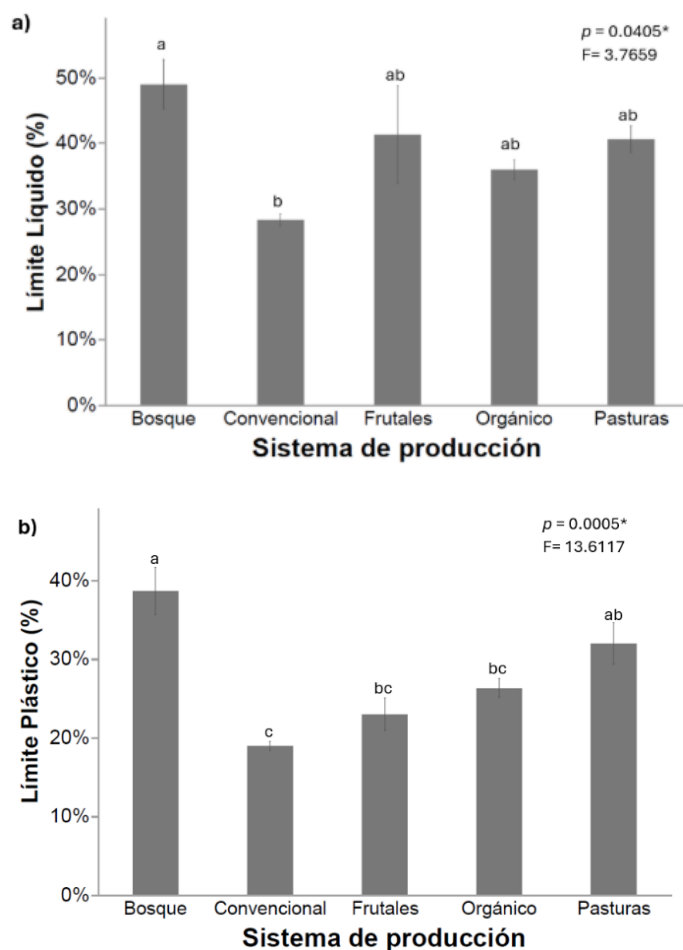


Fig. 2 Caracterización del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en cinco usos de suelo contrastantes. (a) Límite Líquido (%); (b) Límite Plástico (%); (c) Índice de Plasticidad (%). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.

### C. Relaciones funcionales entre propiedades físicas de suelos

La matriz de correlación de Pearson (Tabla III) revela asociaciones significativas entre diversas propiedades físicas del suelo evaluadas, lo que permite una comprensión más integral de los procesos que gobiernan su comportamiento estructural. Se identificó una correlación positiva y significativa entre el diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados y el límite líquido (LL), así como con los contenidos de arcilla (Ar) y limo (L), mientras que mostró una correlación negativa con el contenido de arena (A). Esto indica que los suelos con mayor proporción de fracciones finas tienden a desarrollar agregados de mayor tamaño y estabilidad, debido a su mayor capacidad de retención de agua y cohesión interna.

El índice de estabilidad de agregados (EA) presentó correlaciones altamente significativas con el DMP y el LL, así como correlaciones positivas con el límite plástico (LP), el contenido de carbono orgánico (CO), la porosidad total (PT) y las fracciones finas (Ar y L), y negativas con la densidad aparente ( $\rho_b$ ) y la arena. Estas asociaciones sugieren que los suelos con mejor desarrollo estructural presentan mayor estabilidad, retención de agua y comportamiento mecánico favorable.

La correlación entre el EA y el CO destaca el rol clave de la materia orgánica en la agregación del suelo, en concordancia con lo reportado en [25], donde se demostró su función estructurante en la organización de la matriz edáfica. Esta interacción entre textura y materia orgánica constituye un factor determinante en la estabilidad estructural. Adicionalmente, lo anterior concuerda con lo reportado por Aksakal et al. [26], quienes encontraron que la estabilidad de los agregados aumenta con su tamaño. En este contexto, el uso del DMP como indicador en este estudio se valida como una medida representativa de la estabilidad estructural, ya que incorpora una gama amplia de clases de tamaño. Una mayor estabilidad estructural está vinculada a una porosidad más eficiente y a

condiciones óptimas de retención hídrica, elementos esenciales para el desarrollo radicular y la sostenibilidad de los agroecosistemas [27].

En cuanto a los límites de Atterberg, el LL mostró correlaciones positivas con el EA, LP, DMP, CO, PT y las fracciones finas, y negativas con pb. Por su parte, el LP se correlacionó positivamente con el LL, CO, PT, EA y las fracciones finas, y negativamente con pb. Estas relaciones reflejan una interdependencia funcional entre el LL y el LP, característica de suelos con alta actividad coloidal, como lo documentado por [28].

La asociación entre el LP, el LL y el contenido de CO sugiere que la materia orgánica incrementa la plasticidad sin generar restricciones para la mecanización, en concordancia con lo reportado por Suravi et al. [29]. En conjunto, se pone de manifiesto el valor diagnóstico de los límites de Atterberg, en particular del límite líquido (LL) y del índice de plasticidad (IP), como herramientas complementarias para la evaluación de la calidad física y estructural del suelo. Estas propiedades integran los efectos de la textura, el carbono orgánico, la porosidad y el manejo, lo que subraya la necesidad de un enfoque holístico en el análisis de la funcionalidad del suelo [30].

TABLA III  
 MATRIZ DE CORRELACIÓN DE PEARSON ( $P < 0,05$ )  
 UTILIZADA EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE  
 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN DISTINTOS  
 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.

|         | D<br>MP  | E<br>A | LL    | LP    | IP    | C<br>O | pb    | PT    | A     | L     | Ar    |
|---------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D<br>MP | 1,0<br>0 | 0,98   | 0,61  | 0,50  | 0,30  | 0,47   | -0,43 | 0,45  | -0,60 | 0,56  | 0,52  |
| EA      | 0,98     | 1,00   | 0,66  | 0,63  | 0,19  | 0,60   | -0,55 | 0,57  | -0,62 | 0,60  | 0,52  |
| LL      | 0,61     | 0,66   | 1,00  | 0,80  | 0,51  | 0,60   | -0,63 | 0,63  | -0,55 | 0,58  | 0,39  |
| LP      | 0,50     | 0,63   | 0,80  | 1,00  | -0,11 | 0,87   | -0,83 | 0,84  | -0,52 | 0,60  | 0,30  |
| IP      | 0,30     | 0,19   | 0,51  | -0,11 | 1,00  | -0,26  | 0,14  | -0,15 | -0,17 | 0,11  | 0,21  |
| CO      | 0,47     | 0,60   | 0,60  | 0,87  | -0,26 | 1,00   | -0,76 | 0,71  | -0,50 | 0,50  | 0,39  |
| pb      | -0,43    | -0,55  | -0,63 | -0,83 | 0,14  | -0,76  | 1,00  | -0,98 | 0,76  | -0,81 | -0,52 |
| PT      | 0,45     | 0,57   | 0,63  | 0,84  | -0,15 | 0,87   | -0,98 | 1,00  | -0,71 | 0,81  | 0,42  |
| A       | -0,60    | -0,62  | -0,55 | -0,52 | -0,17 | 0,50   | 0,76  | -0,71 | 1,00  | -0,93 | -0,88 |
| L       | 0,56     | 0,60   | 0,58  | 0,60  | 0,11  | 0,50   | -0,81 | 0,81  | -0,93 | 1,00  | 0,64  |

|    |          |      |      |      |      |      |       |      |       |      |      |
|----|----------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|
| Ar | 0,5<br>2 | 0,52 | 0,39 | 0,30 | 0,21 | 0,39 | -0,52 | 0,42 | -0,88 | 0,64 | 1,00 |
|----|----------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|

Abreviaturas: DMP = diámetro medio ponderado; EA = estado de agregación; LL = límite líquido; LP = límite plástico; IP = índice de plasticidad; CO = carbono orgánico; pb = densidad aparente ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); PT = porosidad total; A = arena; L = limo; Ar = arcilla.

#### IV. CONCLUSIONES

La estabilidad estructural del suelo, evaluada mediante el Diámetro Medio Ponderado (DMP) y los agregados estables al agua, mostró diferencias claras entre sistemas de manejo. Los sistemas con cobertura permanente presentaron mayor estabilidad estructural, mientras que el manejo convencional evidenció degradación física asociada a la perturbación mecánica y menor contenido de materia orgánica.

Los límites de consistencia (límite líquido y límite plástico) resultaron sensibles al uso del suelo, reflejando mayor plasticidad y cohesión en sistemas con vegetación permanente. En contraste, el manejo convencional presentó reducción en la funcionalidad mecánica del suelo, confirmando la utilidad de los límites de Atterberg como indicadores de calidad física.

El análisis de correlación evidenció relaciones significativas entre estabilidad estructural, plasticidad, textura y densidad aparente, destacando la interdependencia de las propiedades físicas del suelo.

El carbono orgánico emergió como el principal factor estructurante, asociado positivamente con la agregación y plasticidad del suelo, lo que reafirma su papel central en la resiliencia edáfica y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

#### V. RECOMENDACIONES

Se recomienda incrementar el número de réplicas por sistema de manejo para fortalecer la potencia estadística y reducir la variabilidad experimental.

Es conveniente evaluar sistemas con tiempos de implementación similares y condiciones edafoclimáticas homogéneas, a fin de aislar el efecto real del manejo sobre las propiedades físicas del suelo.

Se sugiere incorporar análisis complementarios de carbono orgánico fraccionado y biomasa microbiana para profundizar en los mecanismos biofísicos asociados a la agregación y estabilidad estructural.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Hartmann, B. Frey, J. Mayer, P. Mäder and F. Widmer, "Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming," *ISME J.*, vol. 9, no. 5, pp. 1177–1194, 2015.
- [2] L. Schreefel, R. Schulte, I. de Boer, A. P. Schrijver and H. van Zanten, "Regenerative agriculture – The soil is the base," *Global Food Security*, vol. 26, p. 100404, 2020.
- [3] R. K. Srivastava and A. Yetgin, "Influence of root architecture on soil carbon sequestration potential," *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, vol. 36, no. 2, pp. 165–178, 2024.
- [4] W. D. Reynolds, C. F. Drury, X. M. Yang, C. A. Fox, C. S. Tan and T. Q. Zhang, "Land management effects on the near-surface physical quality of



- a clay loam soil,” *Soil and Tillage Research*, vol. 96, nos. 1–2, pp. 316–330, 2007.
- [5] G. C. Topp, W. D. Reynolds, F. J. Cook, J. M. Kirby and M. R. Carter, “Physical attributes of soil quality,” in *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, E. Gregorich and M. Carter, Eds., vol. 25, pp. 21–58, Elsevier, 1997.
- [6] K. P. Panayiotopoulos, S. Kostopoulou and E. Hatjiyiannakis, “Variation of physical and mechanical properties with depth in Alfisols,” *International Agrophysics*, vol. 18, pp. 1–??, 2004.
- [7] T. Guhra, K. Stolze and K. U. Totsche, “Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 164, p. 108483, 2022. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108483
- [8] M. J. Carter and B. A. Stewart, *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [9] M. Moncada, D. Gabriels, W. Cornelis and D. Lobo, “Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators,” *Land Degradation & Development*, vol. 26, no. 8, pp. 843–852, 2015.
- [10] R. E. Yoder, “A direct method of aggregate analysis of soils,” *Agron. J.*, vol. 28, no. 5, pp. 337–351, 1936.
- [11] E. I. Ekwue, A. T. Dookhoo and A. Chakansingh, “A wet sieving apparatus for determining aggregate stability of soils,” *J. Assoc. Prof. Eng. Trinidad Tobago*, vol. 46, no. 1, pp. 35–40, Jun. 2018.
- [12] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behaviour*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [13] H. U. Rehman, N. Pouladi, M. Pulido-Moncada and E. Arthur, “Repeatability and agreement between methods for determining the Atterberg limits,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 84, no. 1, pp. 21–30, 2020.
- [14] B. C. O’Kelly, “Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations,” *Geotechnics*, vol. 1, no. 1, pp. 59–75, 2021.
- [15] W. D. Kemper and R. C. Rosenau, “Aggregate stability and size distribution,” in *Methods of Soil Analysis*, A. Klute, Ed., pp. 425–442, Soil Science Society of America, 1986.
- [16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*, 6th ed. Bogotá, Colombia: IGAC, 2006.
- [17] N. Paiz, “Caracterización del carbono orgánico y la microbiota edáfica en diferentes sistemas de producción en Zamorano, Honduras,” Master’s thesis, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2024.
- [18] J. Clunes, S. Valle, J. Dörner, O. Martínez, D. Pinochet, F. Zúñiga and W. E. H. Blum, “Soil fragility: A concept to ensure a sustainable use of soils,” *Ecol. Indic.*, vol. 139, p. 108969, 2022.
- [19] K. Chrenková, J. Mataix-Solera, P. Dlapa and V. Arcenegui, “Long-term changes in soil aggregation comparing forest and agricultural land use in different Mediterranean soil types,” *Geoderma*, vols. 235–236, pp. 290–299, 2014.
- [20] J. Six, E. Elliott and K. Paustian, “Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 32, no. 14, pp. 2099–2103, 2000.
- [21] R. J. Even and M. F. Cotrufo, “The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation,” *Geoderma*, vol. 442, p. 116760, 2024.
- [22] S. Stanchi, M. D’Amico, E. Zanini and M. Freppaz, “Liquid and plastic limits of mountain soils as a function of the soil and horizon type,” *CATENA*, vol. 135, pp. 114–121, 2015.
- [23] T. Keller and A. R. Dexter, “Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content,” *Soil Research*, vol. 50, no. 1, p. 7, 2012.
- [24] C. Cao, M. Cai, L. Zhao and G. Li, “Improving water stability of soil aggregates with polyvinyl alcohol as a polymeric binder,” *Polymers*, vol. 16, no. 13, Art. no. 1758, 2024.
- [25] J. Fukumasu, N. Jarvis, J. Koestel, T. Kätterer and M. Larsbo, “Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil,” *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 73, no. 1, p. e13212, 2022.
- [26] E. L. Aksakal, I. Angin and S. Sari, “A new approach for calculating aggregate stability: Mean weight aggregate stability (MWAS),” *CATENA*, vol. 194, p. 104708, 2020.
- [27] O. Seguel S. and I. Orellana S., “Relación entre las propiedades mecánicas de suelos y los procesos de génesis e intensidad de uso,” *Agro Sur*, vol. 36, no. 2, pp. 82–92, 2008.
- [28] R. M. Schmitz, C. Schroeder and R. Charlier, “Chemo–mechanical interactions in clay,” *Applied Clay Science*, vol. 26, nos. 1–4, pp. 351–358, 2004.
- [29] K. N. Suravi et al., “The effect of organic carbon content on soil compression characteristics,” *Soil & Tillage Research*, vol. 209, p. 104975, 2021.
- [30] S. Moradi, “Effects of CEC on Atterberg limits and plastic index in different soil textures,” *International Journal of Agronomy and Plant Production*, vol. 4, no. 9, pp. 2111–2118, 2013.