

Propiedades físicas del suelo y su relación con el rendimiento del cacao (*Theobroma cacao* L.) en Cuyagua, estado Aragua

Orlando Mirabal¹, Zenaida Lozano^{2*}, Juan Carlos Rey^{2,3}, Deyanira Lobo², Egli Castillo²
Napoleón Fernández², Gustavo Martínez³, María Fernanda Rodríguez³, Adriana Cortez³
y Ramón Vidal³ (†)

¹Semillas Valle S.A. Portuguesa, Venezuela

²Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Apdo. 4563. Maracay, 2101-A. Venezuela

³Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Aragua, Venezuela

RESUMEN

Para evaluar la relación entre la variabilidad de las características físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), se llevó a cabo un estudio en la Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua, la cual se dividió en dos lotes: un de mayor rendimiento (LA) y otro de menor rendimiento (LB). Se muestreo el suelo en un esquema radial en 4 puntos para cada lote (LA y LB), a dos profundidades (0-15 y 15-40 cm). En cada punto se tomaron muestras y se determinó en muestras disgregadas: contenido de agua (%H) y distribución de tamaño de partículas (DTP), y en muestras no alteradas: densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), poros de aireación (Pa), poros de retención (Pr), conductividad hidráulica saturada (Ks) y módulo de ruptura (MR). En campo se determinó la resistencia mecánica a la penetración (RMP). Para evaluar la productividad se tomaron 5 plantas por punto y se contabilizó: número mazorcas/árbol (NM), número de semillas/mazorca (NSA), peso fresco de semillas/mazorca (PFS) y peso seco de semillas (PSS). Se calculó: índice de almendra (IA), índice de mazorca (IM) y rendimiento. Para el análisis de resultados se aplicó estadística descriptiva y multivariada. Las variables que permitieron la separación de los lotes fueron: Pr, contenidos de limo (L), arena media (am) y arena gruesa (ag). Se encontró una correlación positiva entre la productividad y variables como: Pt, Ks y algunas fracciones de arena; mientras que con Da, Pr, MR y el contenido de arena muy fina, la correlación fue negativa, especialmente en la capa subsuperficial. Las principales limitaciones físicas encontradas estuvieron relacionadas con la textura y el bajo contenido de materia orgánica, lo que le confiere baja retención de agua y nutrientes, por lo que la incorporación de materia orgánica humificada puede ser una opción para mejorar los rendimientos.

Palabras clave: Agroecosistema tropical, análisis multivariado, variabilidad de suelos, limitaciones físicas.

*Autor de correspondencia: Zenaida Lozano

E-mail: zenaidalozano@gmail.com

Soil physical properties and its relationship with the yield of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Cuyagua, Aragua state

ABSTRACT

With the purpose of evaluating the relationship between the variability of the soil physical characteristics, and the yield of the cocoa crop (*Theobroma cacao* L.), a study was carried out on a farm in Cuyagua, Aragua state, which was divided into two lots based on crop productivity: highest production lot (AL) and lowest production lot (BL). Soil sampling was carried out in a radial scheme at 4 sampling points for each lot (GL and BL), at two depths (0-15 and 15-40 cm). For laboratory determinations at each point, disaggregated samples were taken for moisture content (MC%), and size particle distribution (SPD), and unaltered for bulk density (BD), total porosity (TP), aeration pores (AP), retention pores (RP), saturated hydraulic conductivity (SHC) and modulus of rupture (MR). In the field, the mechanical resistance to penetration (MRP) was determined. To evaluate productivity, 5 plants were taken per point and the following were measured: number of ears per tree (NE), number of seeds per ear (NS), fresh weight of seeds per ear (FWS) and dry weight of seeds (DWS), and the following were calculated: almond index (IA), ear index (EI) and yield. Descriptive and multivariate statistics were applied to analyze the results. The variables that allow the separation of lots were Pr, silt (L), medium sand (ms), and coarse sand (cs) content. A positive correlation was found between some soil physical variables such as Pt, Ksat and some arena fractions, with crop productivity; however, with BD, RP, MR and very thin sand content, the correlation was negative, especially in the subsurface layer. The main physical limitations found in the plots are related to the texture and low content of organic matter, related to low water and nutrient retention, so the incorporation of humified organic matter can be an option to improve crop yields.

Key words: Tropical agroecosystem, multivariate analysis, soil quality, physical limitations.

INTRODUCCIÓN

Venezuela es reconocida por producir granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) con excelentes características de aroma y sabor a partir de plantas de tipos Criollos y Trinitarios (Rodríguez, 2023). Además, tiene una serie de ventajas competitivas para la producción de este rubro en comparación con otros países de la región: i) una posición geográfica estratégica, que favorece el intercambio comercial a nivel internacional; ii) existencia de condiciones agro-climáticas favorables para el cultivo; iii) valor ecológico del cultivo de cacao, considerado un rubro conservacionista, con la ventaja adicional de permitir cultivos asociados; iv) posibilidades de rehabilitación de viejas plantaciones y potencialidad para desarrollar nuevas áreas de cacao fino; v) la calidad de los cacaos finos producidos en el país (cacao fino de aroma), es reconocida internacionalmente, entre otras (Quintero, 2021; MPPAPT, 2023; Rodríguez, 2023). Específicamente el cacao de la zona de Cuyagua (estado Aragua) resalta por su sabor amaderado, a nuez y frutos secos, y el gran tamaño de sus granos, características debida a su zona geográfica.

A pesar de esas ventajas, durante el siglo XX y primeras décadas del siglo XXI, la producción y exportación de cacao en Venezuela ha mostrado una tendencia fluctuante, con una oferta irregular, con predominio de periodos de estancamiento y disminución, y otros de recuperación (Quintero, 2021). Según FEDEAGRO (2024), entre 1998 y 2021 se produjo un rendimiento promedio de 300 kg ha⁻¹; muy por debajo del promedio mundial de 500 g ha⁻¹ (Quintero, 2016; FAO, 2022).

La baja productividad promedio del cultivo de cacao en el país, y específicamente en la zona de Cuyagua, se atribuye a una serie de factores tales como: predominio de plantaciones viejas, presión demográfica; presión por el cambio de uso de la tierra hacia cultivos más rentables; baja densidad de

siembra; edad avanzada de los productores (55 a 65 años en promedio), y dificultades con la generación de relevo; financiamiento insuficiente e inoportuno; incidencia de plagas y enfermedades e inadecuado manejo agronómico, entre otros (Trujillo, *et al.*, 1999; Quintero, 2021). Por otro lado, ha ocurrido un grave deterioro genético debido al progresivo reemplazo de los materiales criollos por híbridos más productores y resistentes a plagas y enfermedades, pero con calidades inferiores.

Muchas de estas limitaciones obedecen a la escasa información sobre las condiciones agroecológicas en la que se encuentran establecidas las plantaciones cacaoteras, especialmente lo relacionado con las propiedades físicas del suelo, lo que conlleva a la existencia de pocas opciones para mejorar la productividad del cultivo, tal y como lo establecen los planes de desarrollo del país. La recuperación de la producción y calidad del producto en las zonas productoras, depende de un oportuno y efectivo manejo agronómico basado en tecnologías comprobadas (fertilización, enclavado, podas, riego, control de malezas, cosecha y postcosecha, entre otros), y con la utilización a corto plazo, de materiales locales de constatada superioridad que permitan una explotación racional y sustentable de los bosques cacao, preservando especialmente la alta calidad que le caracteriza.

También se requiere la incorporación de nuevos productores en las plantaciones cacaoteras, y en especial de las zonas de las costas aragüeñas, para lo cual la información de las características del suelo es fundamental.

El manejo de áreas por sitio específico, fundamentada en el estudio de la variación espacial y temporal de los recursos, permite obtener información relacionada con variables de interés en la producción agrícola, y luego correlacionarla espacialmente con el rendimiento (Espinosa *et al.*, 2004). El propósito de este trabajo fue determinar la relación entre la variabilidad de las propiedades físicas de un suelo y el rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la localidad de Cuyagua, municipio Costa de Oro, estado Aragua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: el estudio se realizó en la Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua (357 125 E -1 159 794 N), que posee una superficie de 150 ha al margen del río Grande, manejada por 31 socios asentados en tierras del estado. Las tierras son clase II a IV por capacidad de uso, ubicadas en paisaje de piedemonte en la zona de vida de Bosque Seco Tropical, con seis a nueve meses húmedos (Jiménez *et al.*, 2012). La precipitación promedio anual es de 771 mm, temperatura media de 25,7 °C (máx. 30,7 °C y mín. 21,9 °C), y humedad relativa de 91,58 % (Red Agroclimática INIA, período 1970-2014). Los suelos son de textura medias a gruesas, con incrementos de arena (gruesa o muy fina) en profundidad, de color marrón oscuro a marrón grisáceo, pH de neutro a alcalino y alto contenido de materia orgánica a nivel superficial (Rodríguez *et al.*, 2003).

Delimitación de áreas por niveles de productividad: Se seleccionó dentro de la Hacienda un área de 50 ha en producción en el sector Remedio de Pobre, ubicado entre las coordenadas: 642 708 E - 1 159 314 N; 642.653 E - 1 159 084 N; 642.883 E - 1 159 106 N; 642 883 E - 1 159 321 N), la cual es manejada en lotes de 4 a 5 has por 12 productores. Se realizó una visita diagnóstica con la finalidad de diferenciar zonas en cuanto a la productividad. Con la información suministrada por los agricultores sobre los niveles de producción del cultivo en las diferentes zonas de la parcela, se dividió el área en dos lotes: uno donde los niveles de producción del cacao estaban por encima del promedio de la zona, que se denominó Lote Alto (LA), y otro donde los niveles de producción estaban por debajo del promedio de la zona, que se denominó Lote Bajo (LB). Dentro de cada lote se seleccionaron cuatro (4) áreas representativas de aproximadamente 1000 m², en las cuales se realizó la caracterización del perfil de suelo. En cada área se tomaron muestras de suelo y cultivo para determinar las propiedades físicas del suelo, productividad y estado nutricional del cultivo.

Muestras de suelo: en los cuatro puntos seleccionados en cada lote (LA y LB) se realizó una caracterización del suelo con barreno, hasta 100 cm de profundidad, identificándose el espesor promedio de los dos primeros horizontes (0 – 15 cm y 15 – 40 cm). En cada punto se excavó una minicalicata de 50 cm x 50 cm x 50 cm, y en cada profundidad se tomaron muestras disgregadas y no alteradas (tres repeticiones por profundidad), para evaluar las propiedades físicas del suelo.

Productividad del cultivo: se realizó un muestreo de forma radial (≈ 15 a 20 m de radio) alrededor de cada punto de muestreo de suelo. En cada punto se determinó la población (plantas ha⁻¹), con una cuadrícula de 20 x 20 m. En cada lote se seleccionaron cinco (5) plantas por punto para evaluar: número de mazorcas por árbol (NMP), número de mazorcas dañadas (NMD), número de semillas por mazorca (NSM), peso fresco de semillas (Pfs), peso seco de semillas (Pss), tal como lo sugieren Morera y Mora (1991). Con estos datos se calculó: índice de mazorca (IM) que representa el número de mazorcas necesarias para obtener 1 kg de cacao seco al 7% de humedad, índice de almendra (IA), el cual es el peso promedio (g) de una almendra de cacao seca a 7% de humedad, y rendimiento de cacao seco, que se obtiene multiplicando el peso fresco de cacao por planta por el factor obtenido previamente en laboratorio (peso cacao seco / peso de cacao fresco) por el número de plantas por hectárea, de acuerdo con lo establecido por Ayestas *et al.* (2013). El factor fue de 0,47 para LA y 0,49 para LB.

Muestreo de tejido vegetal: para la determinar el estado nutricional del cultivo se tomaron muestras de tejido en cada lote, en las mismas plantas usadas para determinar productividad, según los criterios establecidos por Chapman (1966) y FERTILAB (2012). Se muestrearon 5 plantas por punto, colectando 25 hojas por cada planta de la 2^{da} o 3^{ra} hoja completamente formada más próxima a los retoños, entre 4 y 8 semanas posteriores a la máxima floración.

Determinaciones analíticas: se determinó directamente en campo la resistencia mecánica a la penetración (10 repeticiones por punto), con un penetrómetro de impacto de punta cónica (Nacci y Pla, 1991). En las muestras disgregadas se determinó: contenido de agua gravimétrica y distribución de tamaño de partículas por el método de Bouyoucos modificado por Day (Pla, 1983). En las muestras no alteradas se evaluó: conductividad hidráulica saturada (Ks), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), poros de radio equivalente > 15 mm o poros de aireación (Pa), y poros de radio equivalente < 15 mm o poros de retención (Pr) y módulo de ruptura en cilindros de suelo secos a 50 °C, siguiendo los métodos descritos por Pla (1983). En las muestras de tejido vegetal se determinó: Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Cobre, Hierro, Zinc y Manganeso, por los métodos descritos en UCV (1993).

Análisis estadísticos: con los datos obtenidos en cada lote se realizó un análisis univariado y la detección y eliminación de valores anómalos (Tukey, 1977). Posteriormente se comprobaron los supuestos del análisis de varianza: i) normalidad de los datos (Shapiro y Wilk, 1965), y ii) homogeneidad de la varianza (homocedasticidad) de los datos (Di Rienzo *et al.*, 2008). Los datos que no presentaron una distribución normal se sometieron a las transformaciones (raíz cuadrada, logaritmo decimal, logaritmo natural y el recíproco), tal y como sugieren Webster y Oliver (1990). Posteriormente se verificó la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los lotes, en las variables tanto de cultivo como de suelo, a través de un análisis de varianza y prueba de medias con la prueba de Tukey. Las variables que no lograron ajustarse a una distribución normal fueron sometidas al análisis de varianza no paramétrico de Kruskal y Wallis (1952).

Para establecer el nivel de interrelación entre las variables del cultivo y del suelo, y determinar cuáles de las variables evaluadas en el suelo describen la productividad del cacao, se realizó un análisis multivariado (Rencher, 2002). Todos estos análisis fueron realizados mediante el software estadístico InfoStat versión 2008. En las correlaciones obtenidas se establecieron tres posibles rangos: correlación alta (>0,75), correlación media (0,50 – 0,75) y correlación baja (<0,50), tal y como lo sugiere Tukey (1977).

Dada la gran cantidad de datos y con el propósito de facilitar el manejo de la información, se realizó un análisis exploratorio de los datos por medio del análisis de componentes principales (ACP), con el software Statistica 6.0, lo que permitió un número reducido de nuevas variables no correlacionadas (componentes) que expliquen la mayor parte de la variabilidad (Demey *et al.*, 1994). Al mismo tiempo, se realizó un análisis discriminante (AD) para establecer grupos y áreas homogéneas en busca de identificar las variables que describan de mejor manera la pertenencia a un grupo y analizar la expresión de productividad de las plantas y su variación con respecto a las propiedades físicas del suelo (Rencher, 2002). El análisis discriminante permitió determinar las variables responsables de esa conformación de grupos, establecer las variables más limitantes en los sitios de menor productividad, y así proponer un manejo para superar esas limitaciones. El AD se validó realizando la clasificación de los individuos que se usaron para generarlo: a) con todos los datos originales, y b) validación cruzada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas: los resultados de la comparación entre en ambos lotes (Alto: LA y Bajo, LB), a las dos profundidades del suelo consideradas (0 a 15 y 15 a 40 cm) se presentan en el cuadro 1. En la distribución de tamaño de partículas (DTP) de los dos lotes y profundidades evaluadas, se pudo observar un contenido muy bajo de partículas de la fracción arcilla (<5%) en todos los sitios de muestreo; mientras que en la fracción limo los valores oscilaron alrededor de 17% en la capa superficial y entre 7 y 13% en la capa subsuperficial.

La fracción arena fue la predominante en todas las muestras analizadas (>79%), con aumentos entre 5 y 10% en las capas subsuperficiales de ambos lotes. Al evaluar la distribución de las arenas (amf: arena muy fina, af: arena fina, am: arena media, ag: arena gruesa y amg: arena muy gruesa), mediante el análisis de la varianza, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para todas estas fracciones entre ambos lotes, con un predominio en el LB de af y amf (alrededor de 30%), y menor proporción de ag y amg (<5%). Por el contrario, en LA la mayor proporción fue de af y am (alrededor de 20%) y la menor de las amf (<10%).

Con respecto a la densidad aparente (D_a), no se presentaron diferencias entre lotes (LA y LB), pero si se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) con la profundidad (0 a 15 y 15 a 40 cm) en ambos lotes, con los mayores valores en la capa más profunda (Cuadro 1). Este aumento de la densidad aparente en profundidad se corresponde con una disminución de la porosidad a esa profundidad, especialmente los poros de aireación ($r > 15 \mu\text{m}$). Sin embargo, estos valores se encuentran por debajo del valor crítico para la producción de los cultivos en suelos de texturas gruesas ($1,70 \text{ Mg m}^{-3}$), de acuerdo con los límites sugeridos por Florentino (1998), lo cual puede atribuirse a las características mineralógicas de las arenas que predominan en estos suelos. La conductividad hidráulica saturada (K_s) presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre lotes (LA y LB) y profundidades (0 – 15 y 15 a 40 cm) para ambos lotes, con los mayores valores en LA y en la capa superficial de ambos lotes (Cuadro 1). Cabe destacar que en este atributo se presentaron altos coeficientes de variación entre (3 - 70 % y 25 - 45 % para el LA y LB, respectivamente).

A pesar de las diferencias entre lotes, en ambos casos los valores de K_s estuvieron por encima de 20 mm h^{-1} , considerada como muy alta por Florentino (1998). Según Ahuja *et al.* (1989), el valor de la K_s está muy relacionado con la porosidad del suelo, en especial con la proporción de aireación o macroporos (P_a); lo que coincide con nuestros resultados, donde se presentó la mayor K_s en el LA, que fue donde se registraron los mayores valores P_a ; además, se evidenció una disminución en la K_s del 36% (LA) y 73% (LB) en la capa subsuperficial, posiblemente debido al aumento de la D_a en las capas subsuperficiales, tal como lo indica Pla (1993).

Cuadro 1. Algunas propiedades del suelo en los lotes separados con base a la productividad de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la hacienda Cuyagua, estado Aragua.

Variable	Lote Alto (LA)		Lote Bajo (LB)		
	0 -15 cm	15 - 40 cm	0 -15 cm	15 - 40 cm	
Distribución de tamaño de partícula (%)					
Diámetro de rícula	< 2 µm (A)	3,68 ±0,60 ¹	3,63 ±1,18	3,35 ±0,64	4,23 ±1,20
	2 - 50 µm (L)	16,55 ±3,75	8,61 ±3,24	17,53 ±3,28	12,71 ±1,83
	50 - 2000 µm (a)	79,77 ±3,98	87,77 ±4,42	79,13 ±3,77	83,07 ±2,40
	50 - 100 µm (amf)	9,50 ±1,73	9,86 ±3,08	32,57 ±11,46	33,50 ±9,74
	100 - 250 µm (af)	19,68 ±3,10	22,71 ±2,27	29,30 ±5,28	29,85 ±6,25
	250 - 500 µm (am)	22,56 ±1,16	23,18 ±2,78	13,01 ±3,71	14,28 ±5,80
	500 - 1000 µm (ag)	16,57 ±2,99	15,12 ±1,38	3,56 ±1,65	4,19 ±2,60
	1000 - 2000 µm (amg)	11,46 ±6,04	16,89 ±9,65	0,68 ±0,23	1,25 ±0,32
Clase textural	aF	a	aF	aF	
Índices estructurales					
Densidad aparente, Da (Mg m ⁻³)	1,14 A ² b ³	1,39 Aa	1,18 Ab	1,40 Aa	
Conductividad hidráulica saturada, Ks (mm h ⁻¹)	523,13 Aa	344,15 Ab	129,57 Ba	34,48 Bb	
Porosidad total, Pt (% v v ⁻¹)	50,15 Aa	42,04 Ab	42,86 Aa	42,08 Aa	
Poros de aireación, r>15 mm, Pa (% v v ⁻¹)	24,26 Aa	25,07 Aa	20,71 Ba	20,49 Ba	
Poros de retención, r<15 mm, Pr (% v v ⁻¹)	25,88 Aa	16,97 Ab	25,03 Aa	21,59 Ab	
Cohesión en seco, MR (kPa)	10,14 Bb	12,36 Ba	16,47 Ab	38,91 Aa	
Atributos químicos					
Materia Orgánica (%)	1,36 Aa	0,29 Ab	1,18 Aa	0,25 Ab	
Reacción del suelo (pH)	5,20 Aa	5,39 Aa	4,78 Aa	5,15 Aa	

aF: arena francosa, a: arenosa. ¹Desviación estándar. ²Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre los lotes a una misma profundidad. ³Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) por profundidad dentro de un mismo lote.

Para la porosidad total (Pt) y la proporción de poros de retención (Pr) o microporos, no se encontraron diferencias estadísticamente entre lotes, pero sí hubo diferencias estadísticas significativas (p<0,05) con la profundidad, con los mayores valores en la capa superficial para ambos parámetros (Cuadro 1). Con relación a los poros de aireación (Pa) o macroporos, se presentaron diferencias estadísticas (p<0,05) entre lotes, con los mayores valores en LA, pero sin diferencias entre las profundidades en ninguno de los lotes. Las diferencias en Pa entre ambos lotes se pueden atribuir al arreglo espacial de las partículas de arena (af y amf) que predominan en el LB, las cuales podrían taponar los poros de aireación. Estos resultados también pudieran estar relacionados con las diferencias en los contenidos de materia orgánica en ambos lotes (Cuadro 1). A pesar de estas diferencias entre lotes, los valores promedios de Pa estuvieron por encima de los valores considerados como críticos (10%) para el desarrollo de las plantas, según Pla (1983) y Florentino (1998).

Los valores de módulo de ruptura (MR), que representan la cohesión en seco del suelo, evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre lotes y profundidades. En el LB los valores de MR fueron 1,6 y 3,1 veces mayores que los del LA en las profundidades de 0 – 15 y 15 – 40 cm, respectivamente. En ambos lotes, los valores de MR fueron menores en la capa superficial y aumentaron en la capa subsuperficial. A pesar de estas diferencias, en ninguno de los lotes los valores estuvieron por encima del valor crítico de 300 kPa sugerido por Pla (1983) como limitante para la penetración de raíces. El MR se relacionó de forma negativa con la conductividad hidráulica ($r = -0,54$), porosidad total ($r = -0,67$), porosidad de aireación ($r = -0,58$), contenido de arena total ($r = -0,80$), y contenido de arena muy fina ($r = -0,59$); y de forma positiva con los contenidos de arcilla ($r = 0,74$), limo ($r = 0,82$), y porosidad de retención ($r = 0,55$).

En los valores de resistencia mecánica a la penetración (RMP) no se presentaron diferencias estadísticas por efecto del tipo de lote ni la profundidad, debido a la alta dispersión de los valores (Figura 1a), con coeficientes de variación de 58,27% en LA y 52,31% en LB, similares a los señalados por Lozano (2006). Algunos autores (Nacci y Pla, 1992; Pla, 2010a; Pla, 2010b) señalan que la resistencia mecánica del suelo está relacionada con la humedad del suelo, el contenido de materia orgánica y la distribución y geometría del espacio poroso. En este caso, los mayores valores de RMP estuvieron relacionados negativamente con el contenido de agua en el suelo ($r = -0,64$), expresando que a menor humedad hay una mayor cohesión (Figura 1b) con resultados similares a los de Nacci y Pla (1992) y Lozano (1995), entre otros.

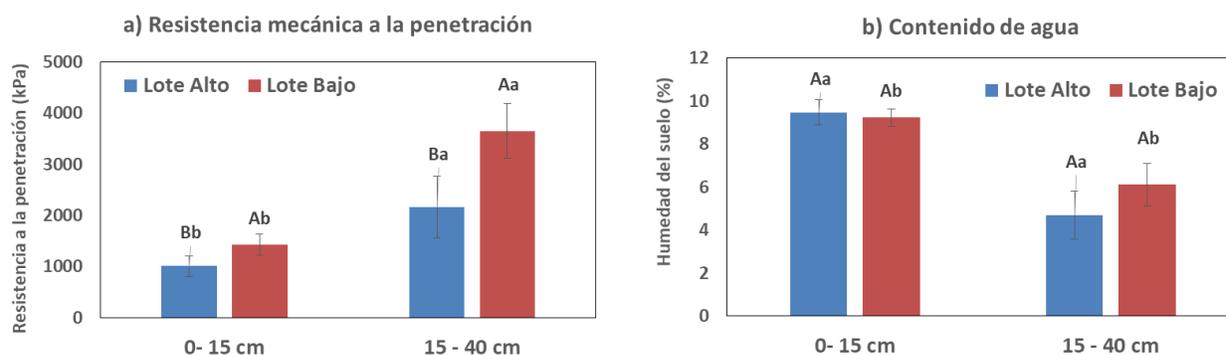


Figura 1. Relación entre a) Resistencia mecánica a la penetración y b) Contenido de agua, en los suelos en los lotes separados con base a la productividad de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua.

Las variaciones en la RMP con la profundidad en ambos lotes se evidenciaron mejor cuando esta variable se evaluó cada 5 cm, tal como se muestra en la Figura 2. Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en ambos lotes con la profundidad, con los menores valores (< 500 kPa) en los primeros 5 cm de profundidad, aumentando a medida que se profundiza en el perfil. En el LA el aumento de la RMP fue más uniforme hasta alcanzar valores cercanos a 3000 kPa en la capa más profunda, mientras que en el LB se presentaron mayores valores en todas las capas, alcanzando valores mayores a 3000 kPa a los 25 cm de profundidad, y con una resistencia mecánica similar a partir de esa profundidad.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Nacci y Pla (1992), quienes notaron un marcado incremento de la RMP a medida que se profundizaba en el perfil de un suelo sembrado con cítricos de 5 años, y lo atribuyendo este efecto a los altos valores de densidad aparente y a la reducción de la Pa en las capas subsuperficiales. Sin embargo, al calificar los valores de RMP, aplicando los criterios planteados

por Florentino (1998), ambos lotes califican con un nivel de compactación medio, lo cual supone que no existen mayores problemas de permeabilidad al aire, flujo de agua y restricciones en el crecimiento y profundización de las raíces. En ninguno de los lotes se aprecian valores mayores al límite máximo considerado por Pla (1993) de 5000 kPa como limitantes para el desarrollo de las raíces de los cultivos.

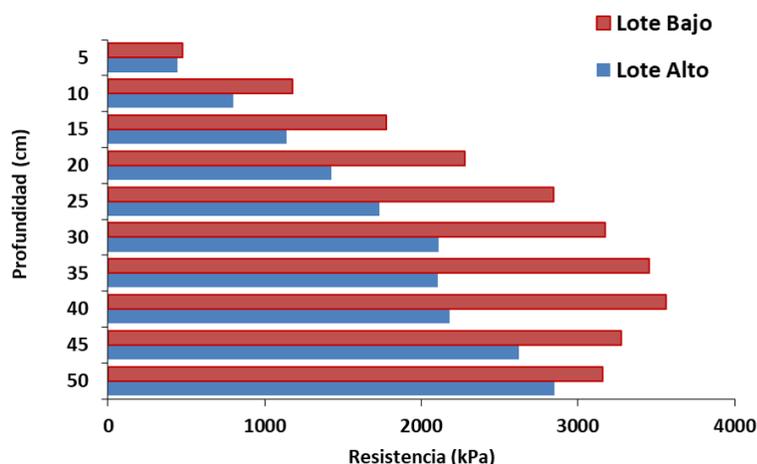


Figura 2. Resistencia mecánica a la penetración a diferentes profundidades en los lotes separados con base a la productividad de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua.

Estado nutricional del cultivo: los parámetros relacionados con el estado nutricional del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) se presentan en el Cuadro 2, para los lotes de suelo separados con base a la productividad (LA y LB). Los resultados del análisis de varianza demostraron que los valores nutricionales de manera general presentan una condición cuasi homogénea en ambos lotes y que estos no presentaron diferencias estadísticas significativas.

Cuadro 2. Contenido nutricional en el tejido del cacao (*Theobroma cacao* L.), en los lotes de suelo separados con base a la productividad en la Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua.

Variable	Lote Alto (LA)	Lote Bajo (LB)	Rango crítico ¹
Nitrógeno (N, %)	2,14 ±0,13 ²	2,03 ±0,15	2,0 – 2,3 %
Fósforo (P, %)	0,12 ±0,01	0,12 ±0,01	0,20 – 0,23 %
Potasio (K, %)	1,16 ±0,06	1,10 ±0,02	2,1 – 2,4 %
Calcio (Ca, %)	0,55 ±0,10	0,51 ±0,07	0,5 – 0,8 %
Magnesio (Mg, %)	0,40 ±0,05	0,43 ±0,08	0,4 – 0,6 %
Cobre (Cu, mg kg ⁻¹)	12,45 ±6,95	12,08 ±0,29	20 – 25 mg kg ⁻¹
Hierro (Fe, mg kg ⁻¹)	92,66 ±42,89	90,64 ±33,53	150 – 250 mg kg ⁻¹
Zinc (Zn, mg kg ⁻¹)	51,53 ±11,95	51,26 ±15,44	55 – 70 mg kg ⁻¹
Manganeso (Mn, mg kg ⁻¹)	117,49 ±65,26	121,99 ±45,24	80 – 110 mg kg ⁻¹

¹Rango crítico de nutrientes en tejido de cacao según Malavolta *et al.* (1989). ²Desviación estándar.

Los valores nutricionales obtenidos para la plantación en ambos lotes según los rangos críticos para el cultivo señalados por Malavolta (1989), indican que en ambos lotes se presentan bajos contenidos en tejido de los macronutrientes P y K y de los micronutrientes Fe y Cu (Cuadro 2). También se consiguieron contenidos de Mn por encima del rango crítico, pero sin llegar a nivel de toxicidad. Estos resultados se atribuyen a la baja disponibilidad de estos nutrientes en ambos lotes, dada su textura gruesa (aF- a) y bajo contenido de materia orgánica (0,25 – 1,38%), que contribuyen a la baja retención de nutrientes y su pérdida por lixiviación, y al pH ácido (4,78 – 5,39) que afecta la solubilidad de los nutrientes. Trujillo (2015), quien midió las propiedades químicas del suelo en la misma zona, consiguió que el pH fue la variable más relacionada con los parámetros de productividad del cultivo, dado su marcado efecto sobre la disponibilidad de los nutrientes.

Productividad del cultivo: los resultados de los índices de productividad del cultivo evaluados: número de mazorcas por planta (NMP), número de semillas por mazorca (NSM), peso fresco de la semilla (Pfs), índice de almendra (IA), índice de mazorca (IM) y rendimiento de cacao seco por hectárea, se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Índices de productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en los lotes de suelo separados con base a la productividad (Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua).

Variable	Lote Alto (LA)	Lote Bajo (LB)
Número de mazorcas por planta (NMP)	16,8 ± 3,8 ¹ a ²	12,9 ± 0,9 b
Número de semillas por mazorca (NSP)	35,0 ± 4,7 a	27,6 ± 3,7 b
Peso fresco de semillas (Pfs, g)	3,26 ± 0,60	4,15 ± 0,81
Índice de almendra (IA, g)	1,60 ± 0,29	2,04 ± 0,40
Índice de mazorca (IM, N°)	18,54 ± 3,95	19,06 ± 1,92
Densidad de siembra (plantas ha ⁻¹)	491,2 ± 117,5	631,2 ± 108,7
Rendimiento seco de cacao (kg ha ⁻¹)	449,6 ± 93,1	329,06 ± 110,4

¹Desviación estándar. ²Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas.

De las variables de productividad evaluadas, solo el NMP y NSM presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre lotes, en el resto de las variables analizadas no hubo diferencias estadísticas, debido principalmente a la alta variabilidad de los datos analizados.

Se presentó un 30% más NMP en LA que el LB. Los valores conseguidos en este trabajo fueron inferiores a los indicados por Ramos *et al.* (2004) de 35 a 100 mazorcas/árbol/año, lo que indica una baja producción en ambos lotes de la Hacienda, lo que se puede atribuir a factores tales como: edad avanzada de las plantaciones, manejo deficiente, bajas densidades de siembra, alta variabilidad genética, o características edáficas limitantes.

Con respecto al NSM, los valores en LA fueron 27% superiores a los de LB. De acuerdo a lo descrito por Braudeau (1970), el número de semillas por mazorca deseable está entre 25 y 50, por lo que en ambos lotes la cantidad de semillas se encuentra dentro de los límites aceptables de productividad.

Ayestas *et al.* (2013), al evaluar 100 árboles promisorios de cacao en haciendas orgánicas de Nicaragua, con características de manejo similares a las de la Hacienda Campesina Cuyagua, consiguieron un promedio de 39 semillas por mazorca, resultados similares a los obtenidos en el LA, Por su parte Reyes y Capriles (2000) indican que el número de semillas por fruto varía con el tipo de cacao: desde 25 – 30 en los Criollos, hasta 60 – 70 en algunos Forasteros amazónicos.

Los valores del Pfs estuvieron cercanos a 4 g en ambos lotes (LA y LB). Cabe destacar que los valores obtenidos son similares a los señalados por Angulo *et al.* (2001), quienes obtuvieron en la localidad de Cumboto, valores promedios en el Pfs de 4,34, 3,02 y 3,18 g para cacaos tipo Criollos, Forasteros amazónicos y Trinitarios, respectivamente. Ambas localidades pertenecen a la región centro norte costera del país. El peso de la almendra de cacao es una de las características más importantes, ya que los cotiledones constituyen la materia prima fundamental para la industria chocolatera y confitera (Reyes y Capriles, 2000). En el caso del IA, tampoco se encontraron diferencias estadísticas entre lotes y sus valores promedios estuvieron alrededor de 2 (Cuadro 3). Estos valores son superiores a los requerimientos mínimos agronómicos e industriales de 1 g, según Arciniegas (2005). Dado que el IA es un indicador de rendimiento, es de gran utilidad para la selección de clones de cacao en estudios de mejoramiento, así como para el procesamiento industrial. A mayores valores de IA, menos semillas se requieren para obtener un kilogramo de cacao seco.

Por su parte, el IM es otro de los componentes importantes del rendimiento, el cual nos indica el número de mazorcas necesarias para obtener un kilogramo de cacao fermentado y seco. Para los lotes evaluados este indicador no presentó diferencias estadísticas (Cuadro 3), con valores alrededor de 19 mazorcas en ambos lotes. Ampuero y Alvarado (1960) indican que desde el punto de vista agronómico e industrial los valores bajos en el IM son los adecuados, un árbol que necesite más de 20 mazorcas para producir un kilogramo de cacao seco no es aceptable, a menos que posea otras características sobresalientes, por lo que de acuerdo a este autor, los resultados obtenidos de IM en esta investigación se encuentra dentro del rango aceptable.

La densidad de siembra no es un parámetro de productividad como tal, pero sí afecta el cálculo del rendimiento del cultivo. Se estimó la densidad de siembra en cada lote y no se presentaron diferencias estadísticas, a pesar de las diferencias absolutas (Cuadro 3). Los valores obtenidos en ambos lotes (491 a 631 plantas ha^{-1}) son considerados bajos, de acuerdo con lo recomendado por Paredes (2003) de aproximadamente 1100 plantas ha^{-1} para distancias de siembra de 3 m x 3 m. De las bajas densidades en ambos lotes se puede inferir que la diferencia en algunos de los indicadores de rendimiento, no se debe a competencia entre plantas. Con relación al rendimiento, en el LA fue un 54% mayor que en el LB (Cuadro 3). A pesar de las diferencias absolutas, para esta variable no se detectaron diferencias estadísticas, lo cual se puede atribuir a la alta variabilidad (desviaciones estándar) dentro de cada lote. Es importante destacar, que el rendimiento del LB está ligeramente por debajo del rendimiento promedio del país de 338 kg ha^{-1} (FEDEAGRO, 2024), mientras que el del LA lo supera en un 34%.

Relación entre las características físicas del suelo y la productividad del cultivo: debido a que las variables de productividad del cultivo dependen una de la otra para sus cálculos, era de esperarse altos coeficientes de correlación entre ellas, apreciándose valores mayores a 0,7 para la mayoría de ellas. El NMP y NSM presentaron una correlación inversa con el Pfs y con el IA, aquellos árboles que registraron menor NMP y a su vez, menor NSM, tendían a tener almendras más pesadas.

Estas mismas variables fueron las que mejor se relacionaron con el rendimiento, con una correlación positiva, explicando así el aumento en el rendimiento en el LA, donde se registraron los mayores valores. Al evaluar la influencia de las propiedades físicas del suelo sobre las variables que explican la productividad del cultivo de cacao, se puede apreciar que existen altos coeficientes de correlación entre ambos tipos de variables.

Las variables del suelo que favorecieron el NMP y el NSM (correlación positiva), con el consecuente aumento en el rendimiento fueron: Pt, Ks y los contenidos de am, ag y amg; mientras que Da, Pr, el contenido de amf y MR se correlacionaron negativamente con el NSM, especialmente en la capa subsuperficial. De estas variables, sólo Da y MR se relacionaron negativamente con el rendimiento, lo que se pudo asociar a limitaciones al desarrollo de las raíces dentro del suelo.

Mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP), se redujo el número de variables a aquellas que ejercen mayor influencia sobre el comportamiento del suelo y el rendimiento del cultivo (Componente Principal, CP), lo que facilita la interpretación (Cuadro 4).

En el Cuadro se puede observar el valor propio y el acumulado de la varianza total para los 7 componentes principales generados. Dado a que en los tres (3) primeros CP se acumula más del 75 % de la varianza total, se consideró seleccionar a éstos para explicar el comportamiento de los lotes evaluados.

Cuadro 4. Valores propios y proporción de la varianza total de los componentes principales generado a partir de datos estandarizados (Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua).

Componente	Valor propio	Total de varianza (%)	Acumulado (%)
1	16,91551	45,71759	45,7176
2	7,47538	20,20373	65,9213
3	4,08287	11,03479	76,9561
4	3,06709	8,28944	85,2455
5	2,25251	6,08787	91,3334
6	1,81467	4,90450	96,2379
7	1,39197	3,76209	100,0000

Al analizar los coeficientes de las variables en los 3 primeros CP, resaltan los coeficientes de mayor peso dentro de cada componente. La mayoría de las variables están asociadas al CP1, que es el que acumula la mayor varianza total, y que agrupa las variables del suelo relacionadas con Pt y DTP, especialmente para la capa subsuperficial, y Ks, MR y RMP para ambas profundidades; además, agrupa la variable de NSM como indicador de productividad del cultivo de cacao.

El CP2 por su parte asocia la mayoría de las variables que indican la productividad del cultivo (NMP, Pfs, IA, IM y rendimiento) con la Da y los contenidos de a, L y A, para la capa superficial como variables del suelo. El CP3 agrupa la variabilidad no explicada por CP1 y CP2, con poca asociación de variables, solo Pr (microporos) en la capa superficial y contenido de A en la capa subsuperficial (Cuadro 5).

En la Figura 3a se muestra la proyección de los componentes principales CP1 vs CP2, donde se ubican los 8 puntos de muestreo, formando dos grupos con comportamientos contrastantes. Los primeros 4 puntos correspondían al LA, y se ubicaron entre el primer y cuarto cuadrante, con una valoración positiva respecto al CP1, mientras que los puntos correspondientes al LB (del 5 al 8) se ubicaron en el otro extremo, entre el segundo y tercer cuadrante, con valoración negativa para el CP1. Los resultados muestran la relación existente entre las variables físicas del suelo y las de productividad del cultivo, con una clara separación entre el LA y LB.

La Figura 3b muestra la proyección de los mismos componentes, pero representando gráficamente todas las variables, para discriminar cuales variables están más asociadas a la diferenciación de lotes. A mayor asociación con el CP1, más peso en la separación. Se pudo detectar que las variables responsables de la separación para LA fueron: Pt, Pa, am, ag, amg y Ks, en la capa subsuperficial.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de las variables físicas del suelo y productividad del cultivo, para los primeros 3 componentes principales (Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua).

Variable	Componente		
	1	2	3
PT1	0,865245	-0,283022	0,238507
PT2	-0,134854	-0,593546	-0,113469
Macro1	0,423273	-0,600320	0,322996
Macro2	0,679427	-0,232977	-0,022156
Micro1	0,124331	0,449979	0,636417
Micro2	-0,834611	-0,287321	-0,078440
Da1	-0,285928	0,483706	0,332399
Da2	-0,177478	0,796324	0,498131
Ks1	0,933934	-0,080567	0,076995
Ks2	0,854886	0,332989	-0,108610
MR1	-0,590502	-0,179295	-0,077098
MR2	-0,688391	0,161429	0,597868
RMP1	-0,540063	-0,479866	-0,140304
RMP2	-0,665666	-0,338460	-0,230891
Arc1	0,292197	-0,484638	0,185164
Arc2	-0,501926	-0,132594	0,644256
Limo1	-0,333762	-0,764962	0,370272
Limo2	-0,861911	-0,204266	0,339358
are1	0,256636	0,781246	-0,369889
are2	0,821073	0,198359	-0,446772
amf1	-0,831168	0,233085	-0,405884
amf2	-0,866253	0,196661	-0,408344
af1	-0,819486	-0,362135	0,013378
af2	-0,692683	-0,349269	-0,125849
am1	0,802486	-0,177389	0,519760
am2	0,687226	-0,299919	0,508104
ag1	0,958025	0,135185	0,237797
ag2	0,917353	-0,066942	0,337004
amg1	0,924889	0,292730	0,065411
amg2	0,933147	0,223964	-0,055857
MPta	0,578738	-0,636853	0,026285
SMaz	0,803150	-0,106766	-0,425687
PSH	-0,596414	0,692437	0,344318
IA	-0,596414	0,692437	0,344318
IM	-0,169558	-0,901698	0,116698
Pob	-0,642795	-0,392842	0,359333
Rend	0,512667	-0,675481	-0,176774

PT: Porosidad total, Macro: Macroporos, Micro: Microporos, Da: Densidad aparente, Ks: Conductividad Hidráulica, MR: Modulo de ruptura, RMP: Resistencia mecánica a la penetración, Arc: Arcilla, are: Arena total, amf: Arena muy fina, af: Arena fina, am: Arena media, ag: Arena gruesa, amg: Arena muy gruesa, MPta: Mazorcas/planta, SMaz: Semillas/mazorca, PSH: Peso de semilla húmeda, IA: Índice de almendras, IM: Índice de mazorca, Pob: Densidad de plantas, Rend: Rendimiento. 1: Profundidad 0-15 cm; 2: profundidad 15-40 cm

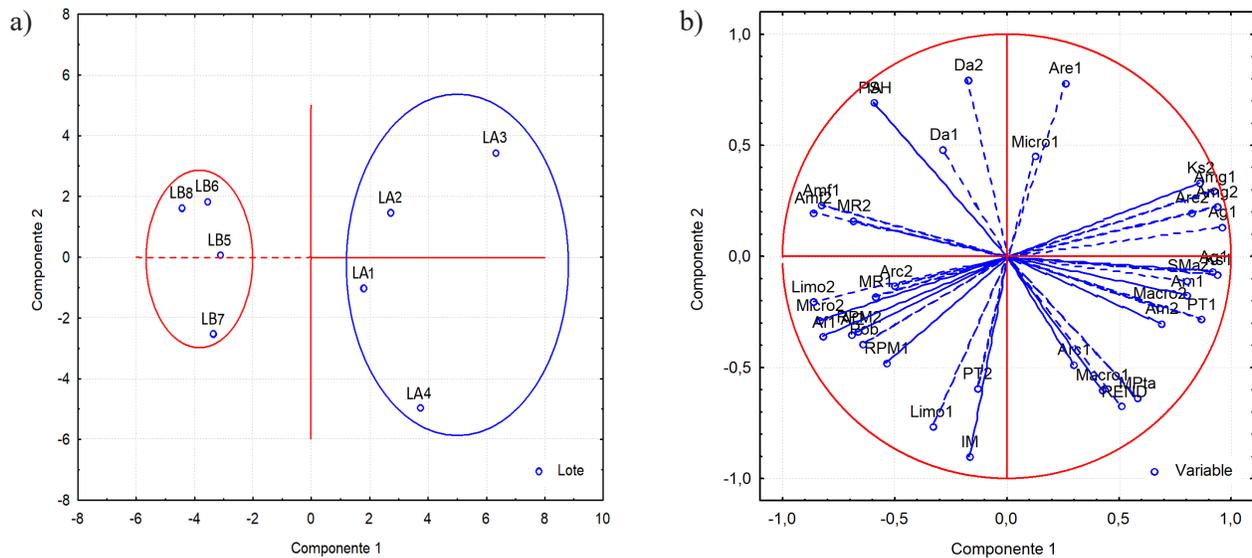


Figura 3. Proyección de los componentes principales 1 y 2: a) mostrando los puntos evaluados por cada lote; b) mostrando las variables físicas del suelo y de productividad del cultivo (Hacienda Campesina Cuyagua, estado Aragua).

A pesar de que el análisis univariado del rendimiento del cultivo no arrojó diferencias significativas, en el estudio multivariado esta variable sí permite diferenciar los lotes, encontrando que el LA es el que posee mayor rendimiento, además de mayor NMP y NSM. Por su parte, el LB está asociado a variables cuyos valores elevados puede acarrear limitaciones físicas para la productividad del cultivo, tales como: Pr, L, af, amf, Da, MR y RMP, especialmente en la capa subsuperficial.

Por último, la realización de un análisis discriminante (AD) permitió validar si realmente los grupos creados en el ACP son correctos o no. Se realizó sólo con las variables que más aportan a la variabilidad de los datos, obteniendo una función discriminante, lo que indica que efectivamente hay dos clases o grupos. Se puede apreciar que, de acuerdo a esta función, las variables que tienen mayor poder discriminativo en orden de importancia son: contenido de ag en la capa superficial (26 394), rendimiento (25 128), contenido de L (10 189), contenido de am (-4 646) y Pr (-2 694), en la capa subsuperficial del suelo, indicando que solo con conocer estas variables, sería suficiente para ubicar el lote en una clase de productividad.

En la validación normal y cruzada de los resultados para corroborar la pertenencia de los individuos suelo a los grupos designados *a priori*, se encontró un 100% de acierto, lo que quiere decir que la conformación de grupos realizada en el ACP efectivamente representa la diferenciación en las características edáficas y de productividad en el LA y LB.

De acuerdo con las variables del suelo que este análisis consideró más importantes al momento de la separación de los lotes (Pr, L, am y ag), la mayoría de ellas están relacionadas con la distribución de tamaño de partículas. A pesar de que el cultivo de cacao puede establecerse en variados tipos de suelos, los de textura gruesa se consideran poco recomendables, especialmente si existe alta presencia de grava o arena gruesa en el subsuelo (Hardy, 1961), por lo que la producción se verá limitada por la textura gruesa de ambos lotes.

Por otro lado al tomar en cuenta la proporción de P_r , la cual se relaciona directamente con P_t , D_a , RMP , MR y K_s , se pueden encontrar limitaciones físicas de igual forma en ambos lotes, pero aún más acentuado en el LB, ya que en el mismo se apreciaron valores, que si bien no llegaron en la mayoría de los casos a considerarse limitantes para la producción del cultivo, si pueden repercutir en mayor o menor grado en el desarrollo y profundización de las raíces, así como en el flujo del aire y agua dentro del perfil del suelo.

Manejo para mejorar la productividad del cacao en función de sus limitaciones físicas

Los suelos de la Hacienda Campesina Cuyagua (estado Aragua), por estar ubicados en ecosistemas de frágil equilibrio ecológico (Jiménez *et al.*, 2012), requieren de un manejo cuidadoso y que las prácticas seleccionadas sean amigables con el ambiente. De acuerdo con los resultados obtenidos, las principales limitaciones del suelo evaluado se relacionan con su DTP, con predominio de fracciones gruesas en ambos lotes, lo que los hace marginales para el cultivo de cacao (Sys *et al.*, 1993). Debido a que la textura de los suelos es una propiedad permanente, no existe labor alguna que optimice esta variable. Por otro lado, los altos valores de P_t , P_a y K_s , hacen que los suelos retengan poca agua, y que gran parte de la que penetra se puede perder rápidamente por drenaje profundo. Obi y Ebo (1995) afirman que dos terceras partes del agua presente a saturación en un suelo arenoso usualmente se drena a potenciales de -30 kPa (cercano al contenido de humedad de capacidad de campo).

Debido a que las propiedades físicas limitantes se presentan principalmente en la capa subsuperficial (15-40 cm), se hace difícil su manejo, ya que se trata de una plantación establecida; sin embargo, es posible hacer mejoras en algunas propiedades físicas de la capa superficial que garanticen una mejor retención de agua y nutrientes.

Por otro lado, los bajos contenidos de arcilla (3,35 – 4,23 %) y materia orgánica (0,25 – 1,38%), permiten inferir una baja retención de nutrientes, por lo que las prácticas para el mejoramiento de los suelos deberían orientarse al incremento de los contenidos de materia orgánica humificada (tipo compost), la cual por su carácter coloidal favorece la retención de agua y nutrientes en el suelo.

Algunos autores han sugerido la aplicación de acondicionadores de suelo (naturales o sintéticos), tales como: polisacáridos, humus, mulches, estiércoles, poliacrilamida, polivinil alcohol, emulsiones asfálticas, silicatos de magnesio o aluminio en solución (Lobo *et al.*, 1984; Rivero *et al.*, 1998; Henríquez, 2000). No obstante, para las condiciones del suelo estudiado, la opción más adecuada, por la facilidad de implementación, bajo costo y su compatibilidad con la fragilidad del agroecosistema, es el uso de materiales orgánicos compostados, tal y como sugieren Restrepo *et al.* (2014), los cuales mejoran las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

El mejoramiento de las propiedades físicas por la incorporación de materia orgánica se debe al aumento de la actividad biológica (microflora y microfauna), la cual acelera el flujo de los ciclos biogeoquímicos e incrementa la biodiversidad. Otros organismos como las lombrices, favorecen la agregación de partículas, promoviendo una mejor estructura, mejorando la aireación, evitando la compactación y por tanto el impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces.

En este sentido, Girón *et al.* (2001), evaluaron el compostaje de restos de cosecha del cacao en tiempo, calidad y cantidad, en combinaciones de cáscaras y hojas secas de cacao con follaje de árnica, pseudotallo de plátano y estiércol de bovinos; esto con la finalidad de darle uso a los recursos asociados al bosque cacao. Estos autores encontraron que la combinación que mostró una mejor dinámica de compostaje fue la de cáscaras de cacao + hojas secas + estiércol. A los 65 días el material compostado presentó coloración oscura, estructura migajosa, temperatura estable y olor a tierra, adecuado para su incorporación al suelo como biofertilizante.

En vista de que en el sistema de producción de la Hacienda Campesina Cuyagua se genera un gran volumen de residuos (restos de cosecha y residuos del bosque), se plantea su aprovechamiento como materia prima en la elaboración del compost.

CONCLUSIONES

La principal limitación para el cultivo de cacao en los lotes separados por productividad en la Hacienda Campesina Cuyagua, fue el predominio de texturas gruesas (Fa, aF y a), lo que les confiere a los suelos baja capacidad de retención de agua y nutrientes. Las variables físicas que se pudieron identificar como responsables de las diferencias en producción de los lotes (Alto y Bajo) fueron: i) la resistencia mecánica a la penetración y el módulo de ruptura, por su efecto sobre el desarrollo de las raíces del cultivo, y ii) la porosidad de retención, el contenido de limo, arena fina y muy fina, las cuales afectan la penetración y retención de agua disponible para el cultivo. En ambos lotes se presentó una baja capacidad de producción, sin variaciones importantes en los indicadores evaluados entre los lotes de mayor producción (LA) y de menor producción (LB), con excepción del número de mazorcas por planta (NMP) y número de semillas por mazorca (NSM). El rendimiento en el LA superó al promedio nacional en aproximadamente 51%. Para superar las principales limitaciones físicas y aumentar los rendimientos actuales en ambos lotes, es necesario aplicar prácticas de manejo que contribuyan a mejorar la capacidad del suelo de retener agua y nutrientes, tales como la incorporación de materia orgánica compostada, elaborada preferiblemente con recursos locales (residuos del sistema de producción de cacao).

AGRADECIMIENTO

Se reconoce el apoyo financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), a través del proyecto PG-01-8647-2013/1, y el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT), a través del proyecto INVUNI 2013-31.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo, J.; L. Graziani; L. Ortiz; P. Parra. 2001. Caracterización física de la semilla de cacao Criollo, Forastero amazónico y Trinitario de la localidad de Cumboto, estado Aragua. *Agronomía Tropical (Venezuela)*, 51(2): 203-219. Disponible https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2002000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es [Consultado: 05/06/2015].
- Ampuero E.; R. Alvarado. 1960. Variación en resistencia a la escoba de bruja, rendimiento e índice de mazorca en la progenie híbrida interclonal. In: *Inter-american Cacao Conference, 8th*. Trinidad y Tobago. pp. 174-183.
- Arciniegas, A. 2005. Caracterización de árboles superiores de cacao (*Theobroma cacao* L.) seleccionados por el programa de mejoramiento genético del CATIE. Tesis Magister Scientiarum. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba. CR. 126 p. Disponible <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4571> [Consultado: 05/06/2015].
- Ahuja, L., D. Cassel, R. Bruce y B. Barnes. 1989. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Sci.* 148: 404-441.
- Ayestas, E.; L. Orozco; C. Astorga; R. Munguía; C. Vega. 2013. Caracterización de árboles promisorios de cacao en haciendas orgánicas de Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49: 18-25. Disponible <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5861> [Consultado: 05/06/2015].
- Braudeau, J. 1970. *El Cacao*. Barcelona, España. Ed. Blume. Colección Agricultura Tropical. 297 p.

- Chapman, H. 1966. Diagnostic criteria for plants and soils. Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley, California. 794 p. Disponible <https://doi.org/10.1093/bioscience/16.5.365-a> [Consultado: 10/06/2024].
- Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios (FEDEAGRO). 2024. Estadísticas Agropecuarias. Disponible en <https://fedegro.org/estadisticas-agricolas/> [Consultado: 10/06/2024].
- Demey, J.; M. Adams; H. Freites. 1994. Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de haciendas agropecuarias. *Agronomía Tropical* (Venezuela), 44(3): 475-497. Disponible en: http://www.sian.inia.gob.ve/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4403/Arti/demey_j.htm [Consultado: 10/06/2024].
- Di Rienzo, J.; F. Casanoves; M. Balzarini; L. González; M. Tablada; C. Robledo. 2008. InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible <http://www.infostat.com.ar> [Consultado: 05/06/2015].
- Espinosa, J.; F. Mite; S. Cedeño; S. Barriga; J. Andina. 2004. Manejo por sitio específico del cacao basado en sistemas de información geográfica. *Informaciones Agronómicas*, 60: 10 -14. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/24556D23CD98D2B9852579A3006D832E/\\$FILE/Manejo%20de%20sitio%20espec%C3%ADfico%20del%20Cacao....pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/24556D23CD98D2B9852579A3006D832E/$FILE/Manejo%20de%20sitio%20espec%C3%ADfico%20del%20Cacao....pdf)[Consultado: 10/06/2024].
- FERTILAB, 2012. Manual de muestreo de suelo, plantas y agua. Tercera Edición, Celaya, México. 25 p.
- Florentino, A. 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos. Valores críticos. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía. UCV. Maracay, Venezuela. 10 p.
- Girón, C.; J. Tortolero; D. Hermoso; I. González. 2001. Efecto de diferentes residuos vegetales en la compostación de cáscara de cacao. *Agronomía Tropical*, 51(4): 549-562.
- Hardy, F. 1961. Manual de cacao. Edición en español. Editorial Antonio Lehmann. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Turrialba, Costa Rica. 439 p.
- Henríquez, R.M.A. 2000. Uso de la poliacrilamida (PAM) como acondicionador de suelo. Serie Docencia N° 45. UCLA. Decanato de Agronomía. Departamento de Suelos. 19 p.
- Jiménez, R.; J. Nogales; M. González. 2012. Importancia de los estudios de capacidad de uso de suelos en agroecosistemas de frágil equilibrio ecológico ubicados en la población de Cuyagua estado Aragua. *INIA Divulga*, enero - abril: 38-40.
- Kruskal, W.; W. Wallis. 1952. Use of ranks on one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47: 583-621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441> [Consultado: 10/06/2024].
- Lobo, D.; I. Pla; A. Florentino. 1984. Uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de maní en un Ultisol arenoso de la Mesa de Guanipa. *Agronomía Tropical*, 34(1-3): 43 – 48.
- Lozano P., Z. 1995. Calibración de métodos para la evaluación de limitaciones físicas. Trabajo de Grado de Maestría en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, Maracay. 95 p.
- Lozano P., Z. 2006. Muestreo con fines de caracterización y evaluación de propiedades de los suelos. *Venesuelos*, 14:70-79. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/984 [Consultado: 10/06/2024].

- Malavolta, E.; G.C. Vitti; S.A. De Oliveira. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. POTAFOS. Piracicaba. 200 p.
- Ministerio del Poder Popular para la Agricultura Productiva y Tierras (MPPAPT). 2023. Situación de la producción del cacao en la región “América Latina y el Caribe. Disponible en: <https://www.sela.org/media/3230960/la-produccion-de-cacao-en-america-latina.pdf>. [Consultado: 01/06/2024].
- Morera, J.; A. Mora. 1991. Evaluación del Cacao híbrido bajo dos sistemas de sombra en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, 41(4): 572-577. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10386> [Consultado: 10/06/2024].
- Nacci, S.; I. Pla. 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. Serie B, N° 17. Maracay (Venezuela). 40 p.
- Nacci, S.; I. Pla. 1992. Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. Agronomía Tropical, 42 (1-2): 115-132.
- Obi M.; P. Ebo. 1995. The effects of organic and inorganic amendments on soil physical properties and maize production in a severely degraded sandy soil in Southern Nigeria. Bioresource Technology, 51: 117-123. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)00103-8](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)00103-8) [Consultado: 10/06/2024].
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2022). FAOSTAT Database Results. Roma, Italia: FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/statistics/es>. [Consultado: 01/06/2024].
- Paredes, M. 2003. Manual del cultivo del cacao. Ministerio de Agricultura. Programa para el desarrollo de la amazonia. Perú. 100 p. Disponible en: <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/372/1/cacao%20-%20copia.pdf> [Consultado: 10/06/2024].
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Revista de la Facultad de Agronomía, Alcance N° 32. Universidad Central de Venezuela. 91 p.
- Pla, I. 1993. Propiedades físicas del suelo. Relaciones con la productividad y procesos de degradación. Métodos de evaluación, y modelaje. Venezuela. pp. 1-35.
- Pla, I. 2010a. Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. I. Propiedades mecánicas. Suelos Ecuatoriales, 40 (2):75-93.
- Pla, I. 2010b. Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. II. Propiedades hidrológicas. Suelos Ecuatoriales, 40 (2):94-127.
- Quintero R., M.L. (2021). La cadena agroalimentaria del cacao en Venezuela: hacia el desarrollo territorial. Agroalimentaria, 26(51), 213-238. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7998166> [Consultado: 10/06/2024].
- Ramos, G.; A. Gómez; A. De Ascencao. 2004. Caracteres morfológicos determinantes en dos poblaciones de cacao criollo del occidente de Venezuela. Agronomía Tropical, 54(1): 45-62. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es [Consultado: 10/06/2024].
- Red Agroclimática INIA. Datos climático del estado Aragua período 1970-2014. Disponible en: <http://agrometeorologia.inia.gob.ve/index.php/resenas-de-estaciones/estado-aragua> Consultado: 20/01/2015].

- Rencher, A. 2002. *Methods of multivariate analysis*. Second Edition. John Wiley & Sons, INC; Publication. New York. 708 p.
- Restrepo J.; J. Gómez; R. Escobar. 2014. Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura. Centro Internacional de Agricultura Tropical- CIAT. Cali, Colombia. 20 p. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_CIAT/Residuos_Organicos_Agricultura_FIDAR.pdf [Consultado: 20/01/2015].
- Reyes, H.; L. Capriles. 2000. El cacao en Venezuela, Moderna tecnología para su cultivo. Chocolates El Rey, C.A. Caracas, Venezuela. 272 p.
- Rivero C.; D. Lobo; A. López P. 1998. Efectos de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades físicas de un alfisol degradado. *Venesuelos*, 6(1 y 2): 29 – 33. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1096 [Consultado: 10/06/2024].
- Rodríguez, M.F.; J.C. Rey; M. Núñez; A. Cortez; R. Salazar; B. Romero. 2003. Conozca el sistema de información de las áreas agroecológicas de Venezuela. CENIAP Hoy. Revista Digital 3, pp. 1-4.
- Rodríguez, J.F. 2023. Evaluación de los prerrequisitos de rastreabilidad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) municipio Mariño, estado Sucre. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencias Agrícolas, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay. 325 p.
- Shapiro, S.; B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52 (3-4): 591–611. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/2333709> [Consultado: 10/06/2024].
- Sys, V.; J. Debaveye; F. Beernaert. 1993. Land Evaluation, part III. International Training Centre for Post -graduate Soil Scientists University of Ghent. Ghent, Belgium. pp. 56-59.
- Trujillo, L. V., Izquierdo, A., & Izquierdo, Á. (1999). Sostenibilidad y pobreza rural: Una interpretación de las potencialidades y limitaciones de los sistemas cacaoteros del estado Aragua. *Revista Agroalimentaria*, 5(8), 93-100.
- Trujillo, R. 2015. Fertilidad química de los suelos y su relación con la productividad del Cacao (*Theobroma cacao* L.), en Cuyagua estado Aragua. Trabajo de Grado, Facultad de Agronomía, UCV- Maracay (Aragua). 80 p. Disponible en: http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/20825/1/Tesis-Final_v4.pdf [Consultado: 10/06/2024].
- Tukey, J. 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Publishing Co. Reading, MA, 668 p.
- Universidad Central de Venezuela (UCV). 1993. Métodos de análisis de suelo y plantas utilizadas en el Laboratorio General del Instituto de Edafología. Cuadernos de Agronomía N° 6. Facultad de Agronomía, UCV. 89 p
- Webster, R.; M. Oliver. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford, University Press. 370 p.