

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGÍA**



**Relación entre la variabilidad de las propiedades físicas de un suelo y el
rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.)**

Br. Orlando Mirabal

Tutora: Zenaida Lozano Pérez

Maracay, Marzo 2016

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGÍA**

**Relación entre la variabilidad de las propiedades físicas de un suelo y el
rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.)**

Br. Orlando Mirabal

Tutora: Zenaida Lozano Pérez

**Trabajo presentado como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero
Agrónomo que otorga la Universidad Central de Venezuela.**

Maracay, Marzo 2016

Aprobación del Trabajo de Grado por el Jurado

Nosotros los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo de Grado, titulado **Relación entre la variabilidad de las propiedades físicas de un suelo y el rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.)**, cuyo autor es el bachiller **Orlando Mirabal**, Cédula de Identidad N°19.468.746, certificamos que lo hemos leído y que en nuestra opinión reúne las condiciones necesarias de adecuada presentación y es enteramente satisfactorio en alcance y calidad como requisito para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

Prof.^a Zenaida Lozano Pérez
CI N° 7.197.043
Tutora – Coordinadora

Prof.^a Mansonia Pulido Moncada
CI N° 14.492.885
Jurado Principal

Prof.^a Tibayde Sánchez
CI N° 4.406.007
Jurado Principal

Prof.^a Adriana Florentino de Andreu
CI N° 7.255.931
Jurado Suplente

DEDICATORIA

A Dios todo Poderoso

A mi madre Yelitza Gabazutt

A mi padre Pedro Pérez (Sandro)

Este trabajo ha sido posible gracias a ustedes

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso

Quien en su infinito amor me ha dado la salud y sabiduría para llegar a alcanzar esta anhelada meta, gracias por levantarme de los momentos difíciles y hacerme más fuerte.

A mi madre Yela

Por ser la persona más grande que Dios me dio, por el apoyo incondicional, por tus consejos, por tu amor y cariño que me han hecho el hombre que soy hoy, esto lo he logrado gracias a ti.

A mi padre Sandro

Por ser ese hombre que desde que llegó a mi vida me ha amado incondicionalmente, me ha apoyado en las buenas y en las malas y me ha brindado su amistad y comprensión.

A mis familiares

Papá Orlando, abuela Lucrecia, abuela María, abuelo Ramón, hermanas, hermanos, tías, tíos, primas y primos, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida, y me han dado su apoyo en todo este paso por la universidad, agradecido de sus buenos consejos, por su amor y sobre todo por los momentos felices, que me hacen sentir el más afortunado de tenerlos.

A mi Negra Bella Jesvic

Por ser esa Novia, amiga y confidente que ha estado en las buenas y malas conmigo, teniéndome paciencia y sobre todo brindándome su infinito amor, eres y serás por siempre una persona especial para mí, que nunca saldrá de mi corazón, gracias por tu apoyo, consejos y momentos felices.

A mis Amigos y Hermanos “Chigüires”

Han hecho de mi vida universitaria la más feliz, se han convertido en más que compañeros, en mis amigos y hermanos: Rodolfo T., Mauro H., Sebastián R., Miguel A. Francisco Da Silva, Patrick M., Manuel H., Manuel V., Robert T., Karión M., Julio R., Gabriel C., Victor M., Careliz M., Glagervic R., Maria A., Nancy O., Jessika De Freitas, Marbelys C. y Yoskarly P. gracias por ayudarme en esos momentos en que lo necesite, brindándome su amistad, amor y sabiduría, nunca los olvidaré y sé que llegaran muy lejos, y seguirán allí pendiente los unos de los otros, y por supuesto inventando un nuevo apodo para mí, son parte importante de este logro en mi vida de ser Ing. Agrónomo. Chigüires por siempre!!

A mis Profesores

Yolimar Goatache, Milagros Borrero y Lino Lugo, por guiarme, brindarme consejos y siempre estar dispuestos a ayudarme en estos 5 años en el que trabajé como preparador de la cátedra de Matemática, el cual me permitió crecer académica y personalmente. Tina Correa, por adoptarnos a mí y el resto de los chigüires como sus hijos, darnos su amor y guiarnos. Zenaida Lozano y Deyanira Lobo, por ser mis tutoras, brindarme todo su tiempo, conocimiento, tenerme paciencia y siempre darme las mejores recomendaciones para que este trabajo fuese el mejor, por su amistad y cariño, infinitas gracias. Juan Carlos Rey, por haberme abierto a un mundo fascinante, el cual quiero conocer aún más, como lo es la Edafología, al ser mi profesor de Introducción a la Ciencia del Suelo y Manejo de suelos, y por ser apoyo fundamental en la elaboración de este trabajo, brindándome su tiempo, conocimiento y amistad. Egli Castillo, por brindarme sus conocimientos desde la primera vez que la conocí en Introducción a la Ciencia del Suelo, y desde allí brindarme su más sincera amistad, gracias por el apoyo y consejos a lo largo de todo este tiempo. Al resto de profesores del Departamento de Edafología en especial: Mansonia Pulido, Ronelly Caballero, María Corina Pineda y Abelardo Ospina.

A todos aquellos profesores que impartieron su conocimiento en cada una de las cátedras de la carrera, y que con su profesionalismo y amor hicieron que amara y respetara profundamente la Agronomía, a ustedes gracias y sigan sembrando conocimiento en muchos muchachos para cosechar grandes profesionales para este país.

A la Hacienda Cuyagua y otros

Gracias al Sr. Félix, por dejarnos entrar en su hacienda, tratarnos con mucho respeto y colaborar en las labores de campo que se realizaron para este trabajo. Al Ing. Agr. Ramón Vidal, por brindarme las herramientas para un mejor conocimiento del cultivo de cacao, además por la ayuda prestada en campo y laboratorio. A la TSU. Ana Torres, del Laboratorio de Física de Suelos, por darme el apoyo en las determinaciones de laboratorio, además de brindarme su amistad y cariño que en poco tiempo pudimos sembrar.

A la Casa que Vence las Sombras

Mi UCV-Fagro, por recibirme bajo su techo y brindarme a pesar de las dificultades las mejores herramientas académicas para lograr esta meta, ser Ing. Agrónomo, y que sin duda le retribuiré trabajando por mi bello país y para lograr que salga de este hoyo en el que se encuentra y pueda seguir pariendo los mejores profesionales.

A todos infinitas GRACIAS, y que DIOS los bendiga!!

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
TABLA DE CONTENIDO	iv
LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ANEXOS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Características, botánica y clasificación del cacao.....	4
Requerimientos agroecológicos del cultivo.....	6
Producción, superficie cosechada y rendimiento del cacao en Venezuela	7
Variabilidad espacial de las características del suelo	9
Fertilidad física del suelo	11
Propiedades físicas de los suelos	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
Área de estudio	15
Muestreo del cultivo.....	16
Muestreo del suelo y determinación de las propiedades físicas del suelo	17
Determinación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo y variables de rendimiento del cultivo de cacao	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
Propiedades físicas del suelo	23
<i>Distribución de tamaño de partículas y clase textural</i>	23
<i>Porosidad total y distribución de tamaño de poros</i>	26
<i>Densidad aparente</i>	28
<i>Conductividad hidráulica saturada</i>	28
<i>Resistencia mecánica a la penetración y módulo de ruptura</i>	30

Productividad del cultivo.....	32
Relación entre las características físicas del suelo y las variables de productividad del cultivo de cacao.....	36
CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS.....	56

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Producción, superficie y rendimientos de cacao en Venezuela.....	8
Cuadro 2.	Distribución del tamaño de partículas.....	23
Cuadro 3.	Matriz de correlación de las variables físicas del suelo y las variables de productividad del cultivo.....	37
Cuadro 4.	Valores propios y proporción de la varianza total de los componentes principales generado a partir de datos estandarizados.....	40
Cuadro 5.	Coefficientes de correlación de las variables físicas del suelo y productividad del cultivo, para los primeros 3 componentes principales...	42
Cuadro 6.	Variables indicadoras y coeficientes de la función discriminante.....	45
Cuadro 7.	Tabla de validación de acuerdo a las funciones discriminantes generadas con un nivel de confianza entre 5 y 10%.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Imagen aérea de la Hacienda Cuyagua.....	15
Figura 2.	Perímetro y ubicación de los puntos de muestreo	16
Figura 3.	Distribución empírica de la variable módulo de ruptura para los datos originales (a) y una vez corregida (b).....	19
Figura 4.	Histograma de la distribución de los datos de módulo de ruptura sin normalizar (a) y normalizados (b).....	20
Figura 5.	Distribución de las fracciones de limo (a), arena fina (b) y arena muy fina (c) promedios, por lote y profundidad.....	25
Figura 6.	Porosidad total, macroporos y microporos promedios por cada lote evaluado a la profundidad de 0 a 40 cm.....	26
Figura 7.	Porosidad total (a), macroporos (b) y microporos (c) promedios, por lote y profundidad.....	27
Figura 8.	Comportamiento de la densidad aparente promedio por lote y profundidad.....	28
Figura 9.	Conductividad hidráulica saturada promedio por lote y profundidad.....	29
Figura 10.	Resistencia mecánica a la penetración promedio por lote y profundidad.	31
Figura 11.	Relación entre la resistencia mecánica a la penetración y la humedad del suelo, para ambas profundidades muestreadas: 0-15cm (a) y 15-40cm (b).....	31
Figura 12.	Módulo de ruptura promedio por lote y profundidad.....	32
Figura 13.	Número de mazorcas por planta (a), número de semillas por mazorca y peso fresco de semilla (c) en cada lote evaluado.	34
Figura 14.	Índice de almendras (a), índice de mazorca (b) y rendimiento (c) por lote.....	36
		Error!
		Bookmar
		k not
		defined.
Figura 15.	Variación explicada por los componentes principales.....	41
Figura 16.	Proyección de los componentes principales 1 y 2 mostrando los puntos	

evaluados por cada lote.....	43
Figura 17. Proyección de los componentes principales 1 y 2 mostrando las variables físicas del suelo y de productividad del cultivo.....	44

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1.	Planilla de descripción del suelo, punto 1 (a) y perfil del suelo (b).....	57
Anexo 2.	Planilla de descripción del suelo, punto 2 (a) y perfil del suelo (b).....	57
Anexo 3.	Planilla de descripción del suelo, punto 3 (a) y perfil del suelo (b).....	58
Anexo 4.	Planilla de descripción del suelo, punto 4 (a) y perfil del suelo (b).....	58
Anexo 5.	Planilla de descripción del suelo, punto 5 (a) y perfil del suelo (b).....	59
Anexo 6.	Planilla de descripción del suelo, punto 6 (a) y perfil del suelo (b).....	59
Anexo 7.	Planilla de descripción del suelo, punto 7 (a) y perfil del suelo (b).....	60
Anexo 8.	Planilla de descripción del suelo, punto 8 (a) y perfil del suelo (b).....	60
Anexo 9.	Estadísticos comunes para las variables físicas del suelo en ambos lotes evaluados.....	61
Anexo 10.	Estadísticos comunes para las variables de productividad del cultivo en ambos lotes evaluados.....	62

RESUMEN

Las propiedades físicas tienen una incidencia directa sobre las relaciones agua-aire en el suelo, y consecuentemente una significancia sobre el desarrollo de las raíces de los cultivos. Es por ello, que con el propósito de evaluar la relación existente entre la variabilidad de las características físicas de un suelo y el rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), se llevó a cabo un estudio en una hacienda de la localidad de Cuyagua, estado Aragua, la cual se dividió en dos lotes, denominándolos lote bueno (LB) y lote malo (LM), referidos a la productividad que los productores han observado a través de los años en la plantación y validados por medio de indicadores de productividad. El muestreo del cultivo se hizo de forma radial alrededor de cada punto de muestreo del suelo, tomando 5 plantas por punto para evaluar: número mazorcas por árbol, número de semillas por mazorca, peso fresco de semillas por mazorca y peso seco de semillas, para determinar: índice de almendra, índice de mazorca y rendimiento. El muestreo del suelo se realizó en forma dirigida en toda la finca, seleccionando 4 puntos de muestreo para cada lote evaluado, en dos profundidades (0-15 y 15-40 cm). Se tomó una muestra alterada para cada profundidad, para determinar la distribución de tamaño de partículas. Además, se tomaron muestras no alteradas en cada punto, para determinar: densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaño de poros, conductividad hidráulica saturada y módulo de ruptura, al mismo tiempo, se determinó la resistencia mecánica a la penetración. Se aplicó estadística descriptiva y multivariada para determinar la variabilidad de las propiedades físicas del suelo, la productividad del cultivo y la relación entre ellas. Los resultados indican que efectivamente existe una correlación positiva entre algunas variables del suelo como la porosidad total, la conductividad hidráulica saturada y la proporción de arena media, arena gruesa y arena muy gruesa, con variables indicadoras de productividad; mientras que variables como densidad aparente, microporos, proporción de arena muy fina y módulo de ruptura se relacionaron negativamente, especialmente en la capa subsuperficial, dando como consecuencia una clara separación de los lotes evaluados con características contrastantes. En general, las principales limitaciones físicas encontradas en los lotes evaluados, tienen que ver con la textura, además del bajo contenido de materia orgánica, que le confieren al suelo de ambos lotes baja capacidad de retener agua y nutrientes, por lo que las prácticas de manejo deben ser dirigidas a la incorporación de materia orgánica mediante la técnica de compostaje, con el propósito de incrementar la capacidad de retención de agua y nutrientes, además de aprovechar otras ventajas, de manera que puedan incrementarse los rendimientos actuales.

Palabras clave: Suelo, propiedades físicas, cacao, *Theobroma cacao* L.

ABSTRACT

The physical properties have a direct impact on water - air relationships in the soil, and consequently a significance on the development of the roots of crops. In order to assess the relationship between the variability of the soil physical characteristics and cocoa yield (*Theobroma cacao* L.), a study was carried out in the Cuyagua farm, in Cuyagua, Aragua State, which was divided into two lots, calling them 'good lot' (LB) and 'bad lot' (LM), concerning the cocoa productivity that farmers have observed over the years in the plantation. Soil samples were taken by directed sampling throughout the farm, selecting 4 sampling points for the LB and 4 points for the LM, at two depths (0-15 and 15-40 cm). A disturbed sample was taken in each depth in order to determine particle size distribution. In addition, undisturbed samples were taken at each point to determine: bulk density, total porosity, pore size distribution, saturated hydraulic conductivity and modulus of rupture. Also mechanical penetration resistance was determined at each sampling point. The crop samples were radially taken around each soil sampling point, taking 5 plants per point in order to evaluate: number of pods per tree, number of seeds per pod, fresh seed weight per pod and dry weight of seed, for calculating: almond index, pod index and yield. Descriptive statistics and multivariate were applied to determine the variability of the physical properties of soil, crop productivity and the relationship between them. The results indicate that there is a positive correlation between some soil variables such as total porosity, saturated hydraulic conductivity and the proportion of medium sand, coarse sand and very coarse sand, with the crop productivity variables. While variables such as bulk density, micropores, proportion of very fine sand and modulus of rupture were negatively related, especially in the subsurface layer, resulting in a clear separation of lots evaluated with contrasting characteristics. In general, the main soil physical limitations found in lots evaluated, have to do with the soil texture, in addition to the low organic matter content, which confer on the soil of both lots low capacity to retain water and nutrients, thus the soil management practices should be directed to the incorporation of organic matter through composting technique, in order to increase the soil water retention capacity and nutrients, while taking advantage of other benefits, so that the current yields can be increased.

Key words: Soil, physical properties, cocoa, *Theobroma cacao* L.

INTRODUCCIÓN

Venezuela forma parte de un selecto grupo de países productores de cacao fino o de aroma, a partir de plantas de tipos Criollos y Trinitarios, los cuales son muy solicitados en el mercado internacional, para la producción de chocolate comestible, cacao para bebidas y manteca de cacao, el cual a su vez es usado en la fabricación de cosméticos y preparaciones farmacéuticas. Sin embargo, el cultivo en el país ha mostrado una marcada tendencia descendente en su producción, decrecimiento de la superficie destinada al cultivo, disminución de los rendimientos, calidad y, en el número de familias dedicadas al rubro (Quintero y García, 2010). Para el año 2014, la producción nacional de cacao se ubicó en poco más de 19.000 Mg, con un rendimiento promedio de 335 kg.ha⁻¹ (FEDEAGRO, 2014), lo que representa la mitad del rendimiento promedio mundial. Particularmente, en el estado Aragua se registran valores menores a los 100 kg.ha⁻¹ de cacao seco (CORPOANDES, 2014).

Estos bajos rendimientos son atribuidos a una serie de factores, tales como: avanzada edad de plantaciones y productores; alta incidencia de plagas y enfermedades, competencia por el agua de riego, escasa adopción de tecnologías e inadecuado manejo agronómico. Muchas de estas fallas obedecen a la escasa información sobre las condiciones edafoclimáticas en el cual se encuentran establecidas las plantaciones cacaoteras (Quintero y García, 2010).

En este sentido, Taylor *et al.* (2003) señalan que la producción de los cultivos fluctúa dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Desde el punto de vista de la física de suelos hay propiedades estáticas que no cambian en el período de crecimiento del cultivo o inclusive por varios años (ejemplos: textura o densidad de las partículas). Por otro lado, hay propiedades físicas que son dinámicas y sus valores pueden cambiar afectadas por un factor externo (ejemplos: densidad aparente, porosidad, contenido de humedad, entre otras), ello conduce a cambios en el desarrollo de las raíces y se limita la absorción de elementos nutritivos con una consecuente disminución en la productividad (Casanova y Lobo, 2007).

El manejo de áreas por sitio específico, se propone como una metodología a implementar en la producción de cultivos, fundamentada en el estudio de la variación espacial y temporal de los recursos. Esto permite obtener información relacionada con variables de interés en la

producción agrícola, y luego correlacionarla espacialmente con el rendimiento (Emmen, 2004; Espinosa *et al.*, 2004).

La creciente demanda de la industria nacional e internacional por almendras de cacao criollos, para la elaboración de productos manufacturados, ha traído como consecuencia la reactivación de este renglón de la producción agrícola del país, habilitándose políticas orientadas al rescate y mejora del cultivo en las áreas cacaoteras tradicionales (Gómez y Azócar, 2002). Es por ello que el propósito de este estudio fue determinar la relación existente entre la variabilidad de las características físicas de un suelo en una plantación en la localidad de Cuyagua, estado Aragua, y el rendimiento del cultivo de cacao, con el objetivo de definir las prácticas de manejo más idóneas para mejorar las condiciones físicas del suelo, considerando su variabilidad, alternativa que puede repercutir positivamente en la competitividad del cultivo, incrementando los rendimientos actuales.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación entre la variabilidad de las propiedades físicas de un suelo y el rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en una plantación en la localidad de Cuyagua, municipio Costa de Oro, estado Aragua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la variabilidad de las propiedades físicas del suelo y de productividad del cultivo en una plantación de cacao.
2. Evaluar la relación entre las propiedades físicas del suelo y su efecto sobre la productividad del cacao.
3. Definir las prácticas de manejo más idóneas para incrementar la productividad del cultivo de cacao en función de sus limitaciones físicas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Características, botánica y clasificación del cacao

El árbol de cacao (*Theobroma cacao L.*), es de porte pequeño, crece en los estratos inferiores de los bosques tropicales, donde encuentra las condiciones adecuadas de sombra, humedad y temperatura. En condiciones naturales alcanza alturas, que llegan a los 9 y 10 metros, con excepciones. En cultivos comerciales cuando ha alcanzado la edad adulta presenta un rango de altura entre los 4 y 8 metros, dependiendo de diferentes factores como: la fertilidad del suelo y la densidad de sombreado, entre otros. Es una planta alógama, estimándose la polinización cruzada en más del 95% (Urquhart, 1963).

Pertenece al orden Malvales, a la familia de las Esterculiáceas y al género *Theobroma*. Su centro de origen se cree está situado en la cuenca del alto Amazonas (América del Sur), en las estribaciones orientales de Los Andes, cerca de los límites de Colombia, Ecuador y Perú (Malespín, 1982). Actualmente es cultivado en la mayoría de los países tropicales, en una zona comprendida entre los 20° de latitud norte y los 20° de latitud sur (Enríquez, 1987).

Urquhart (1963), señala que el *Theobroma cacao L.* es “caulifloro”, lo que significa que las flores y los frutos se producen en las partes más viejas del tronco y de las ramas desprovistas de hojas, son plantas siempre verdes con ramificaciones y hojas dimórficas. La flor es bastante regular y hermafrodita, pentámera, sépalos valvulados, pétalos estrangulados envueltos en botón cimbiforme (en forma de capucha), con 5 estambre opuestos a los pétalos y 5 estaminodios unidos en una corta base tubular, los estambre en dos o tres ramas cortas, anteras de dos celdas, el ovario es simple, con cinco compartimentos que contienen numerosos óvulos situados alrededor de un eje central en el ovario, y el estilo está parcialmente dividido en cinco lóbulos estigmáticos, los cuales se adhieren más o menos entre sí. Hay una constricción en la base del pedicelo, y en ella se produce la abscisión de la flor.

Donde inicia el crecimiento del tronco y se forma o desarrolla el sistema radical, existe una zona de transición bien definida conocida como cuello de la raíz. En plantas reproducidas por semillas, el sistema radical está compuesto por una raíz principal denominada raíz pivotante o raíz primaria, la cual crece hacia abajo de forma recta. Hardy (1961), afirma que en el cacao la mayor parte de las raíces secundarias se encuentran inmediatamente debajo de este cuello, en la porción de los 15 a 20 cm. superiores de la capa húmica del suelo. Estas raíces secundarias,

a menudo se extienden hasta distancias de 5 y 6 m. del tronco, crecen horizontalmente con respecto a éste, emiten raíces laterales y se dividen repetidamente; sus puntos terminales tienden a crecer hacia arriba dentro de la capa húmica. Por otra parte, las raíces secundarias inferiores de la raíz pivotante, tienden a crecer hacia abajo en dirección a la roca madre o hacia la capa freática. Generalmente la parte central de la raíz pivotante está desprovista de raíces secundarias. Las plantas que son reproducidas por medios vegetativos o asexuales no desarrollan raíz pivotante, pero sí raíces primarias y secundarias, de crecimiento horizontal, descritas anteriormente.

Urquhart (1963), señala que el fruto del cacao, que botánicamente es una baya, por lo general contiene de veinte a cuarenta semillas, y a veces hasta cincuenta, cada una rodeada por una pulpa que se forma del integumento externo del óvulo. Las capas externas de células de este integumento toman forma prismática durante el crecimiento de la semilla y su contenido se hace altamente mucilaginoso. Cuando maduran completamente éstas se desintegran y dejan en libertad el mucílago. Por lo menos una de las funciones importantes de la fermentación a la que se someten las almendras después de cosechadas, es la de remover ese mucílago por medio de la acción de microorganismos; esto facilita las operaciones subsiguientes, así como el secado de las almendras. El mismo autor señala que actualmente existe un sistema común de clasificación del Cacao basado en su origen, estableciendo tres grupos: Criollos, Amazónicos y Trinitarios.

El cacao tipo Criollo se caracteriza por presentar frutos cilíndricos, largos, puntiagudos y rugosos de cáscaras delgadas, de color rojo o amarillas cuando maduras, con diez surcos bien marcados terminados en un ápice agudo y presentan una fuerte constricción en la base del fruto. Sus almendras son grandes, redondeadas, de color rojizas y los cotiledones frescos son de color blanco o violeta pálido, presentándose en números no mayor de 30 almendras por fruto. Se le adjudica de gran distinción por su fino aroma y sabor (Urquhart, 1963).

El cacao tipo Amazónico, llamado así porque aparentemente están distribuidos en forma natural en la cuenca de ese río y sus tributarios, se distingue por su rusticidad, amplio rango de adaptabilidad ambiental, caracterizado por presentar frutos generalmente redondeados, de tamaño pequeño y cáscara lisa de color amarillo cuando están maduras, almendras pequeñas, abundantes y achatadas, cotiledones fuertemente pigmentados y compactos de color violeta

oscuro, algunas veces casi negro. El cacao tipo Trinitario es un cruce entre cacaos Criollos y Amazónicos, presentan características intermedias entre los morfotipos antes señalados siendo altamente heterogéneo (Urquhart, 1963).

Requerimientos agroecológicos del cultivo

La distribución mundial del cultivo está limitada, en gran parte, por los rangos restringidos de temperatura bajo los cuales prospera la planta. A escala comercial, las temperaturas favorables pueden fijarse en 15 °C como mínimo de media mensual y en 30°C como máximo. La mínima absoluta puede ser de 10 °C y la temperatura óptima alrededor de 25,5 °C (Urquhart, 1963). La amplitud diaria no debe ser de 9 °C (Sys *et al.*, 1993).

Sys *et al.* (1993), señalan que la precipitación anual requerida por el cultivo debería estar entre 1.600 y 2.500 mm bien distribuidos a lo largo del año, y sin estación seca marcada. La humedad relativa del aire debe estar alrededor de 80%, sin variaciones importantes. Estas características se han señalado frecuentemente, como una condición necesaria para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Sin embargo, las condiciones de alta humedad y alta temperatura son también favorables para el desarrollo de enfermedades fungosas que afectan al cacao (Braudeau, 1970).

En cuanto a las características edafológicas aptas para el cultivo de cacao, Jacob y Von Uexkull (1973), sostienen que este cultivo exige en lo que se refiere a la estructura física del suelo, un volumen de porosidad de aproximadamente 66 %. Son particularmente propicios para cacao, los suelos aluviales, francos y profundos o bien los suelos meteorizados de roca madre básica. Según Hardy (1961), la profundidad del suelo penetrable por las raíces debe ser por lo menos de 1,50 m en el cual se permita la circulación de aire y humedad. Por su parte Sys *et al.* (1993) señalan que los suelos óptimos para cacao deben tener una profundidad efectiva mayor a 100 cm, preferiblemente mayor a 200 cm, con buen drenaje subsuperficial, con espacio poroso para aireación mayor de 10%. En cuanto a textura Hardy (1961) opina que los suelos buenos de cacao comprenden desde suelos arcillosos agregados, hasta franco-arenosos; mientras que la presencia de grava o arena gruesa en el subsuelo, es un carácter indeseable, a menos que la capa freática esté bastante alta. Sys *et al.* (1993) consideran que los mejores suelos para cacao pueden tener texturas medias a pesadas, con menos de 60% de arcilla, mientras que los suelos livianos son valorados como marginales. Hardy (1961) también

afirma que los suelos arenosos son poco recomendables y que los suelos arcillosos son generalmente los mejores, con tal de que sean de estructura agregada y estable en condiciones alternantes de humedad y sequía. Sin embargo, el cacao es capaz de adaptarse a los más variados tipos de suelo, incluso en aquellos cuyo contenido de nutrientes es muy bajo. En estos suelos la producción suele ser muy limitada, pero se pueden lograr rendimientos medios si el cultivo se mantiene bajo un adecuado sombraje y si los demás factores ecológicos son favorables.

La acidez del suelo o pH ideal para el cultivo del cacao se ubica entre 6 y 7, siendo 6,5 el pH óptimo. Sin embargo, el cultivo puede desarrollarse sobre suelos con reacción ácida con pH de 5 e incluso en suelos alcalinos con pH entre 7 y 8 (Reyes y Capriles, 2000). No obstante, Sys *et al.* (1993) señalan que suelos con valores de pH menores de 5,5 o mayores de 7,6 serían marginales para el cultivo, mientras que suelos con valores de pH menores de 5 o mayores de 8,2 serían no aptos. Asimismo, valores de conductividad eléctrica menores de 0,5 dS.m⁻¹ son considerados óptimos para el cultivo, aunque acepta hasta valores de 1,1 dS.m⁻¹.

El contenido de materia orgánica del suelo debe ser cercano a 3,5% en el horizonte superficial del suelo, para contribuir a mantener una estructura granulosa favorable al desarrollo de las raíces, a la absorción de nutrimentos y a la retención de humedad (Reyes y Capriles, 2000). El contenido de elementos nutritivos del suelo depende de su capacidad de intercambio de bases, que debe estar entre 12 y 13 cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹ en el horizonte superficial. El cultivo puede desarrollarse en suelos con valores inferiores a los señalados, siempre y cuando se apliquen fertilizantes periódicamente (Reyes y Capriles, 2000). La relación (K+Na)/(Mg+Ca) debería estar cerca de 1/50 para obtener un buen crecimiento del cultivo, mientras que los niveles óptimos de cationes intercambiables deberían ser: Ca > 8 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg > 2 cmol₍₊₎ kg⁻¹ y K > 0,24 cmol₍₊₎ kg⁻¹. Es deseable que el porcentaje de saturación con bases de suelo sea mayor que 50, aunque valores entre 35 y 50 son considerados adecuados (Sys *et al.*, 1993).

Producción, superficie cosechada y rendimiento del cacao en Venezuela

Con respecto a la producción cacaotera en el país, en el lapso 1997- 2014 (Cuadro 1), el promedio de la producción fue de 18.986 toneladas anuales. Aproximadamente un 40% corresponde al cacao designado como “fino de primera” y el 60% restante a “cacao fino de segunda”, con un bajo nivel de fermentación (CORPOANDES, 2014). La superficie cultivada

con cacao ha registrado un descenso progresivo pasando de 62.085 hectáreas en 1997 a 57.774 hectáreas en 2014, lo que representa una contracción de 6,9 %.

En cuanto al rendimiento éste ha tenido un aumento del 12,4 % para el año 2014 respecto al rendimiento registrado en 1997 (FEDEAGRO, 2014); sin embargo, estos rendimientos representan menos de la mitad del promedio mundial, y apenas una tercera parte del rendimiento promedio de los grandes productores de cacao, tales como Costa de Marfil, Ghana, Nigeria e Indonesia, razón por la cual Venezuela es en la actualidad un productor marginal de cacao, aportando menos de 0,6 % de la producción mundial de este rubro (Quintero y García, 2010).

Cuadro 1. Producción, Superficie y Rendimientos de Cacao en Venezuela

Años	Producción (Mg)	Superficie (ha)	Rendimiento (kg. ha⁻¹)
1997	18.529	62.085	298
1998	17.965	60.746	296
1999	13.918	50.898	273
2000	16.126	56.644	285
2001	15.834	53.706	295
2002	16.164	55.162	293
2003	15.376	50.802	303
2004	17.515	55.662	315
2005	16.946	53.836	315
2006	17.154	51.825	331
2007	17.768	53.230	334
2008	20.457	50.194	408
2009	20.920	51.307	408
2010	20.955	57.090	363
2011	22.856	54.679	418
2012	24.214	56.291	430
2013	29.689	63.023	471
2014	19.363	57.774	335

Fuente: Ministerio del Poder Popular de Agricultura y Tierras, 2014. Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios (FEDEAGRO, 2014).

Variabilidad espacial de las características del suelo

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dentro de los campos agrícolas es consecuencia de los factores y procesos de formación del suelo o puede ser inducida por prácticas de manejo del cultivo (Barrios y Florentino, 2009). Esta se ha considerado el principal tipo de variabilidad que afecta a los suelos, por lo que en los últimos tiempos se ha trabajado intensamente en la adopción y adaptación de metodologías para estudiarla, de modo que se pueda mejorar el manejo de este recurso para tener una mayor eficiencia y rentabilidad en la producción agrícola, así como unas prácticas más amigables con el medio ambiente (Jaramillo, 2012).

En este sentido, Casanova y Lobo (2007), presentan las interacciones entre algunas propiedades físicas del suelo con propiedades asociadas a la fertilidad del suelo y al uso de fertilizantes, más recientemente definida como *fertilidad física*, necesaria para definir las prácticas de manejo que deben ser usadas en un proceso agrícola. Hay procesos en el suelo como la compactación, que produce cambios en propiedades del suelo como la densidad aparente y el espacio poroso. Lo cual conduce a cambios en el desarrollo de las raíces y limita la absorción de elementos nutritivos con una consecuente disminución en la productividad. Esto fue demostrado con una experiencia realizada en Turén (estado Portuguesa, Venezuela), con un suelo compacto cuya densidad aparente era de $1,7 \text{ Mg.m}^{-3}$, y el mismo suelo al cual se le aplicó subsolado para descompactarlo con una densidad aparente de $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$, para el cultivo de maíz, teniendo como variable la productividad. Se pudo observar que en el suelo compacto la productividad fue muy baja (2.500 kg.ha^{-1}), mientras que el suelo descompactado, presentó una mayor productividad alcanzando 4.100 kg.ha^{-1} . Estos resultados lo atribuyen al hecho de que las raíces en el suelo descompactado exploraron un mayor volumen dentro del perfil, lo que les permitió una mejor absorción de agua y elementos nutritivos. Este trabajo evidencia que es necesario que el suelo se mantenga con buenas condiciones estructurales para que el agua aprovechable por los cultivos sea mayor y en consecuencia los nutrimentos tengan una mejor posibilidad de ser absorbidos por las plantas y generar una mayor productividad.

Por su parte Mestas *et al.* (2010), estudiaron la variabilidad espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y de la productividad del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado,

bajo un sistema de siembra directa, con el objetivo de evaluar la dependencia espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y relacionarlos con la variabilidad espacial de la producción del frijol. Luego del análisis estadístico, los autores concluyen que la producción del cultivo bajo condiciones de siembra directa y los atributos físico hídricos del suelo estudiados, presentan una estructura de dependencia espacial con grado moderado. Todas las regresiones obtenidas entre mapas de productividad y de los atributos físicos-hídricos del suelo fueron significativas. La densidad del suelo y la resistencia del suelo a la penetración correlacionaron negativamente con la producción, mientras que la conductividad hidráulica saturada correlacionó positivamente.

Otros estudios solo han buscado determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos, partiendo de la premisa de que dicha variabilidad dentro de los campos agrícolas es inherente a la naturaleza geológica de la formación de suelo, pero en algunos casos puede ser inducida por la labranza y otras prácticas de manejo. Tal es el caso del trabajo realizado por Barrios y Florentino (2009), el cual tuvo como finalidad cuantificar la distribución espacial del impacto que tiene el manejo agronómico del cultivo de la palma aceitera sobre las propiedades físicas del suelo. La evaluación se condujo en las plantaciones comerciales de palma aceitera de la empresa Palmas de Monagas C.A. (PALMONAGAS, C.A.), ubicadas en el Asentamiento Campesino “El Zamuro”, municipio autónomo Maturín del estado Monagas, donde se evaluaron dos tipos de suelos, uno clasificado como Typic Plinthudult, y otro clasificado como Entic Pelluderts. En cada punto de muestreo se evaluaron las siguientes variables: conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, porosidad y distribución de tamaño de partículas. La estadística clásica y los métodos geoestadísticos revelaron diferencias estadísticas y variabilidad espacial entre los suelos, entre los horizontes evaluados y a través del campo. La estructura de los semivariogramas experimentales reveló el impacto de la actividad antrópica sobre las propiedades físicas del suelo, especialmente la densidad aparente, observándose presencia de horizontes compactados en ambos suelos, atribuido al uso de maquinaria agrícola durante el proceso de deforestación, apilamiento de los troncos y extracción de las raíces del suelo; control de malezas con rotativas en etapas jóvenes del cultivo y el paso de carretas y animales de tiro para la cosecha en plantaciones adultas.

Fertilidad física del suelo

La fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo y que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Sánchez, 2007). Por su parte, Oliveira *et al.* (2006) señalan que la fertilidad física, se refiere a la función del suelo como soporte de las raíces y a su capacidad para almacenar y permitir el paso del agua y el aire. Estos aspectos vienen indicados por características como: textura, estructura, porosidad, permeabilidad, entre otros.

Asimismo, Casanova (2005), la define como aquellos factores que contribuyen al crecimiento superficial o en profundidad del sistema radical de los cultivos, permitiendo buena penetración de las raíces, un mayor aprovechamiento de la humedad, una mayor capacidad de absorber nutrimentos del suelo y mayor aireación o disponibilidad de oxígeno.

Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas son las que pueden evaluarse por inspección visual o por el tacto. Pueden medirse contrastándolas con algún tipo de escala, de tamaño, consistencia, intensidad, etc. Cada suelo presenta un conjunto peculiar, de propiedades físicas, que dependen de la naturaleza de sus componentes, de las cantidades relativas de cada uno de ellos y de la manera en que se hallan mutuamente acoplados. Las propiedades físicas poseen una significancia directa porque el espesor de la zona ocupada por las raíces y las relaciones de aire y agua en la misma, se hallan en gran parte determinadas por la constitución física de los horizontes del suelo. Además, presentan una significación indirecta adicional, ya que ciertos aspectos químicos y biológicos de la fertilidad pueden inferirse, al menos aproximadamente, conociendo las propiedades físicas (Thompson y Troeh, 2002).

Entre las propiedades físicas de los suelos más importantes tenemos:

a. Textura: La textura en el suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Específicamente se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo (Gavande, 1982). El conocimiento de la clase textural es importante, ya que además de dar una idea aproximada del contenido de arena, limo y arcilla del suelo, permite hacer inferencias generales acerca de algunas propiedades físicas como la

adhesividad, plasticidad, capacidad de retención de agua, permeabilidad, susceptibilidad a la compactación, entre otras (Brady y Weil, 1999; Casanova, 2005).

b. Estructura: La estructura del suelo es la forma en que las partículas individuales de arena, limo y arcilla se ensamblan en unidades más grandes llamados agregados. Es promovida por la adhesión de esas partículas por varios agentes de unión que influyen en el desarrollo de la estructura del suelo: cantidad y tipo de arcilla, así como los iones intercambiables en la arcilla, cantidad y tipo de materia orgánica, presencia de óxidos de hierro y aluminio, raíces de las plantas, bacterias y hongos que exudan polisacáridos pegajosos permitiendo que las partículas se unan en pequeños agregados, éstos se encuentran separados entre sí por huecos o superficies de ruptura, lo que constituye el espacio poroso. (Tisdall y Oades, 1982; Oades y Waters, 1991). Por su parte Thompson y Troeh (2002), señalan que la estructura del suelo, resulta de la tendencia que experimentan las partículas más finas, especialmente la arcilla y el humus, a unirse entre sí.

Núñez (2000), destaca que la estructura influencia las relaciones hídricas y el desplazamiento del aire en el suelo. El grado de estabilidad que presente le permitirá resistir en mayor o menor grado el impacto de las gotas de lluvia y ofrecer resistencia a la erosión hídrica. El tamaño predominante de los agregados y su grado de desarrollo estructural, influyen la emergencia de plántulas y el crecimiento radical, dificultándolo al máximo si el suelo es masivo.

c. Densidad aparente: Se relaciona directamente con la composición mecánica, el contenido de la materia orgánica y la estructura del suelo. Este valor tiene interés desde el punto de vista de manejo del suelo, ya que da información sobre el grado de compactación (reducción del espacio poroso no capilar) y permite hacer inferencias sobre las posibilidades de emergencia, enraizamiento y circulación de agua y aire dentro del suelo (Lobo *et al.*, 2008).

Por su parte Pla (1995), indica que la densidad aparente interactúa con la resistencia mecánica a la penetración, con la estructura y con la humedad del suelo, todos los cuales afectan el crecimiento de las plantas. Florentino (1989), manifiesta que la densidad aparente del suelo es una propiedad importante y de gran significado agrícola, pero que sus valores deben ser interpretados relacionándolos con la textura del suelo en particular. Propone como densidades aparentes óptimas para el crecimiento de las raíces de una amplia gama de cultivos, valores de

1,20; 1,40; 1,50; y 1,75 Mg.m⁻³ para suelos franco arcillosos, franco limosos, franco arenosos y areno francosos, respectivamente.

d. Porosidad: Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos (poros con radio > 15µm) y microporos (poros con radio < 15µm), donde agua, nutrientes y aire pueden circular o retenerse. Los macroporos son responsables del drenaje y la aireación del suelo y constituyen el espacio donde crecen las raíces, mientras que los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas (FAO, 2014).

Se considera que debe haber un mínimo de 10% de volumen de poros llenos de aire para que los cultivos agrícolas no sufran problemas de anoxia (Taboada y Micucci, 2002). Por su parte Malavolta *et al.*(1989) indican que los pelos absorbentes casi que exclusivamente crecen dentro de los macroporos, por ello en un suelo de buena calidad, se exige que haya un porcentaje de poros grandes mayor del 10% y de que éstos sean capaces de deformarse por la presión de turgencia que produce el crecimiento de las raíces. En suelos compactados, hay pocos macroporos y no hay capacidad de deformación, por ello, las raíces no pueden expandirse o sus cofias no pueden penetrar poros inferiores a sus diámetros, la consecuencia de esto, es bajo rendimiento del cultivo por poco desarrollo de raíces.

e. Resistencia mecánica a la penetración: Es el conjunto de fuerzas desarrolladas por el suelo que se oponen a su deformación ante el crecimiento de órganos vegetales. Es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radical de los cultivos, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. Esa resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente y contenido de humedad, las cuales a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo (Nacci y Pla, 1991).

La relación entre la resistencia mecánica y el contenido de humedad del suelo puede ser explicada por el efecto lubricante de la humedad sobre las partículas del suelo, lo cual permite que dichas partículas se deslicen más fácilmente unas sobre otras y de este modo reducir la resistencia a la penetración (Bravo, 1993).

f. Módulo de ruptura: Es una medida de la cohesión en seco; es la propiedad física del suelo que está relacionada con la emergencia de las plántulas y con el rendimiento de los cultivos.

La medición de la fuerza de cohesión entre las partículas cuando el suelo se seca, tiene interés por su relación con la resistencia a la roturación del suelo, la tendencia a formar terrones duros, la resistencia a roturación de la costra, e incluso la resistencia mecánica a la extensión radical (Pla, 1983).

El conocimiento de las propiedades físicas de los suelos, su variabilidad e interacción entre ellas, permiten obtener un discernimiento del papel que juegan con respecto a la productividad de las plantas (Gavande, 1982), además de permitir delimitar áreas de manejo específico, con el objetivo de definir prácticas que conserven las condiciones físicas del suelo o provoquen cambios en ella que favorezcan la producción agrícola (Pla, 1993).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó, en la Hacienda Cuyagua, con producción de cacao, en la localidad de Cuyagua, municipio Costa de Oro, del estado Aragua. La hacienda tiene una extensión aproximada de 50 has (10,50° Latitud Norte; 67,69° Longitud Oeste). La zona posee tierras de clase II a IV por capacidad de uso, ubicadas en paisaje de piedemonte en la zona climática de Bosque Seco Tropical, con seis a nueve meses húmedos (Jiménez *et al.*, 2012), precipitación promedio anual de 771 mm, temperatura media de 25,7 °C, con máxima de 30,7 y mínima de 21,9 °C, y una humedad relativa de 91,58 % (Red Agroclimática INIA-Período 1970-2014). Los suelos son de textura medias a gruesas, con incrementos en los contenidos 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 en su horizonte superficial (Rodríguez *et al.*, 2003; Jiménez *et al.* 2012).

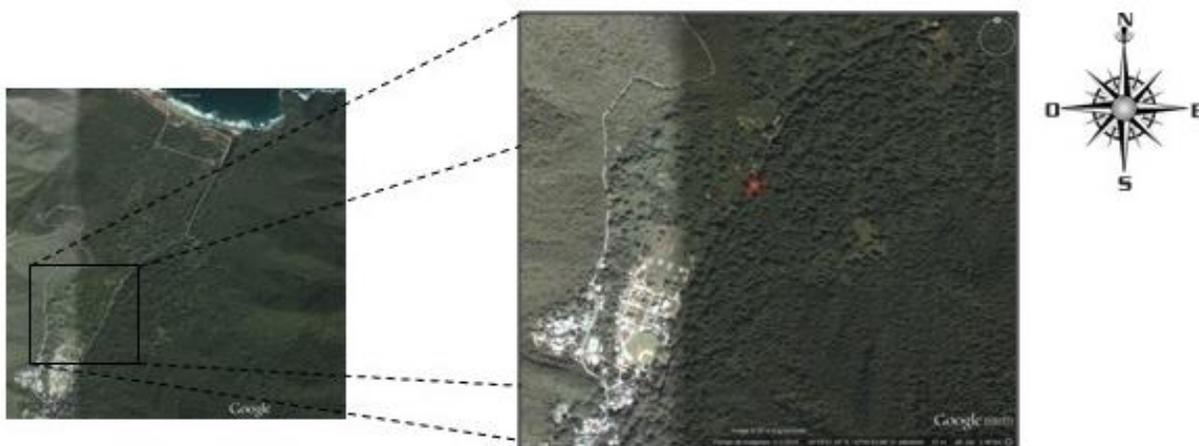


Figura 1. Imagen aérea de la Hacienda Cuyagua (Google Earth, 2015)

Diseño del muestreo

La Hacienda Cuyagua es manejada en la actualidad en lotes de 4 a 5 has por 12 productores. Mediante un taller de trabajo con los productores, el uso de ortofotomapas, recorridos de campo y un GPS se delimitaron los linderos de la finca en su totalidad y de los lotes, con la finalidad de incorporarlo al Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView 3.2 (ESRI,

1996). Se dividió la hacienda en dos lotes, de acuerdo a la información obtenida por los productores, y se denominaron, lote bueno (LB) y lote malo (LM), referidos a la productividad que ellos han observado a través de los años en la plantación. Se implementó un muestreo dirigido en sitios representativos de los niveles de productividad bueno y malo.

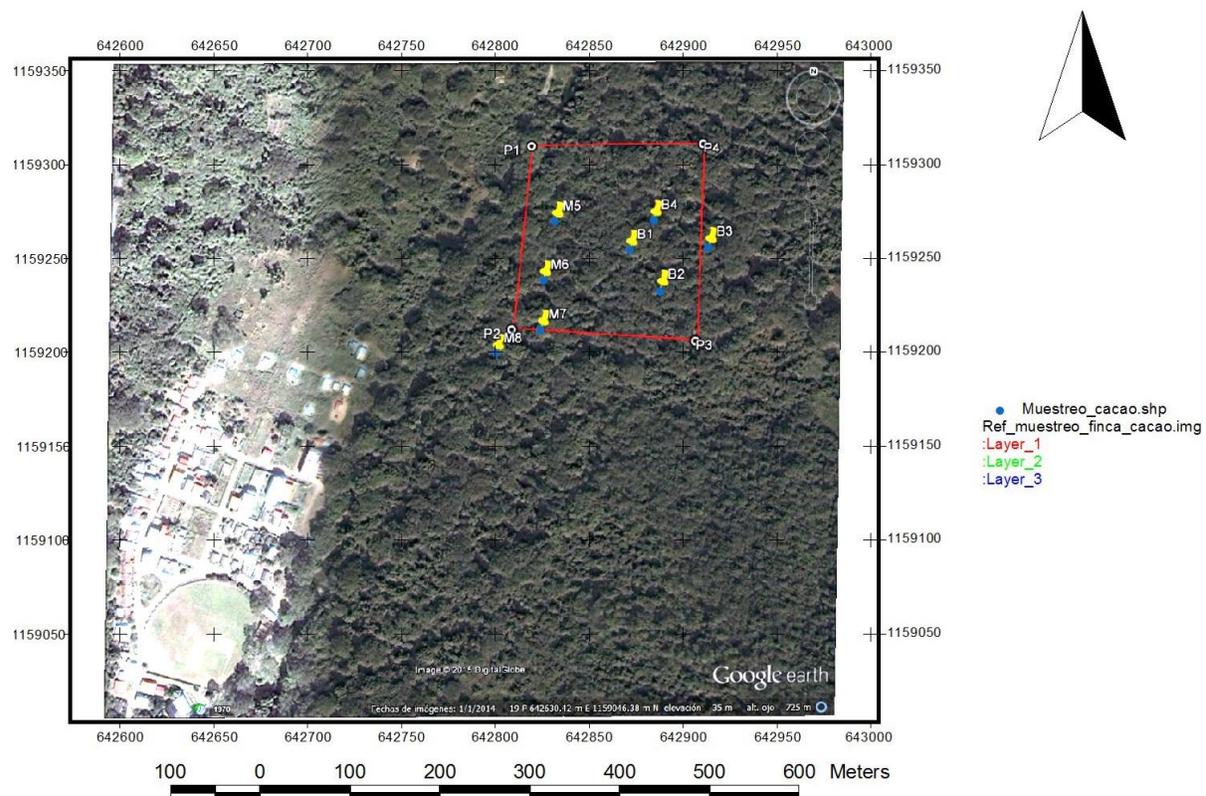


Figura 2. Perímetro y ubicación de los puntos de muestreo

Muestreo del cultivo

La variación espacial del vigor y rendimiento del cultivo de cacao en la hacienda, se realizó mediante determinaciones morfológicas de campo. El muestreo del cultivo se hizo de forma radial alrededor de cada punto de muestreo del suelo (aproximadamente 15 a 20 m de radio). En cada punto se determinó la población de plantas con una cuadrícula de 20x20 m, para obtener la densidad de siembra ($\text{plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$). En cada lote, además se seleccionaron 5 plantas por punto para evaluar: número mazorcas por árbol, número de semillas por mazorca, peso fresco de semillas por mazorca y peso seco de semillas, tal como lo sugieren Morera y Mora

(1991). Con estos datos se determinaron, de acuerdo con lo establecido por Sánchez-Mora *et al.* (2014):

- **Índice de mazorca (IM)**, el cual se refiere al número de mazorcas necesarias para obtener un kg de cacao seco al 7% de humedad. Aplicando la fórmula:

$$IM = \frac{N^{\circ} \text{ mazorcas} \times 1000}{\text{Peso (g) de las almendras secas de } N^{\circ} \text{ mazorcas}}$$

- **Índice de almendras (IA)**, que es el peso promedio, en gramos, de una almendra de cacao seco, al 7% de humedad. Para ello se aplicó la fórmula:

$$IA = \frac{\text{Peso (g) de 100 almendras secas}}{100}$$

- **Rendimiento de cacao seco (kg.ha⁻¹)**, este se calculó multiplicando el peso fresco del cacao por planta por 0.49 para LB y 0,47 para el LM (factor de conversión para obtener el peso seco, obtenido de secar 100g de semillas húmedas en estufa a 105°C por 48 horas).

Muestreo del suelo y determinación de las propiedades físicas del suelo

La variación de las propiedades físicas del suelo en cada uno de los lotes se determinó mediante un muestreo dirigido en toda la hacienda, 4 puntos para el LB y 4 puntos para el LM (separado conjuntamente con los técnicos y productores, en función de la productividad). Al igual que para el caso del cultivo, la ubicación de los puntos se realizó mediante el apoyo del GPS.

La toma de muestras dentro del perfil del suelo, se realizó en dos profundidades (0-15 y 15-40 cm), las cuales se definieron mediante una evaluación previa con barreno en cada zona hasta una profundidad de un metro aproximadamente (Anexo 1).

En cada punto se excavó una minicalicata de 50x50x50 cm de dimensión en la que se tomó una muestra alterada para cada profundidad, en las cuales se realizaron las siguientes

determinaciones: distribución de tamaño de partículas por el método del hidrómetro y contenido gravimétrico de agua, descrito en Pla (1983). La clasificación textural de cada unidad de muestreo se determinó haciendo uso del triángulo textural, de acuerdo a los límites propuestos por el USDA (1992).

Además, se tomaron muestras no alteradas en cada punto (3 submuestras por cada horizonte), para ello se usó un muestreador tipo Uhland, usando cilindros de 5 cm de altura y diámetro aproximadamente. En estas muestras se determinó: densidad aparente por el método del cilindro, porosidad total (EPT) y distribución de tamaño de poros, por el método de la mesa de tensión, la conductividad hidráulica saturada, utilizando un permeámetro de carga constante (Reynolds *et al.*, 2002), expresando los valores en mm.h⁻¹ y el módulo de ruptura por el método de Richards (1953), expresando los valores en kPa, todas estas determinaciones se realizaron mediante los procedimientos descritos en Pla (1983). En campo se determinó la resistencia mecánica a la penetración, con 10 repeticiones por cada punto de muestreo, utilizando un penetrómetro de impacto, el cual utiliza una punta cónica con un ángulo de 25°, área basal de 0,8 cm² y una longitud de 1cm. A esta punta se anexa una varilla de acero de 50 cm de longitud, el impacto es producido por un mazo de 2 kg, permitiendo obtener registro de la resistencia a la penetración que ofrece el suelo a intervalos de 5 cm (Nacci y Pla, 1991). Para su cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$RMP (KPa) = \frac{M^2 \times h \times n}{20(M + m) \times s \times Z}$$

Donde M: Peso de la pesa (g), m: peso del penetrómetro sin la pesa (g), h: altura de caída de la pesa (cm), n: número de golpes, s: área de la base de la punta cónica (cm²) y Z: profundidad (cm).

Determinación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo y variables de rendimiento del cultivo de cacao

Se conformó una base de datos para desarrollar un análisis univariado a cada uno de los resultados obtenidos en laboratorio y en campo, determinando parámetros estadísticos comunes, como: media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y

mínimos, asimetría y curtosis. Para determinar la presencia de datos anómalos que pudiesen afectar el comportamiento general de la variable, se aplicó la metodología propuesta por Tukey (1977), en el que los valores anómalos son identificados con base en la información del rango del intercuartil, considerando datos anómalos aquellos que se encuentren fuera de las cercas externas. Las cercas internas y externas fueron determinadas como sigue:

$$H = 3^{\text{er}} \text{Cuartil} - 1^{\text{er}} \text{Cuartil}$$

$$\text{Paso} = 1,5 \times H$$

$$\text{Cerca Interna Superior} = 3^{\text{er}} \text{Cuartil} + \text{Paso}$$

$$\text{Cerca Interna Inferior} = 1^{\text{er}} \text{Cuartil} - \text{Paso}$$

$$\text{Cerca Externa Superior} = 3^{\text{er}} \text{Cuartil} + 2 \text{ Paso}$$

$$\text{Cerca Externa Inferior} = 1^{\text{er}} \text{Cuartil} - 2 \text{ Paso}$$

Se detectaron datos anómalos sólo para la variable módulo de ruptura, por lo que se procedió a la corrección de éstos sustituyéndolos por el promedio de los valores del lote. En la figura 3 se puede observar la distribución empírica, definida por los valores de la serie posicionados de menor a mayor respecto a la probabilidad asignada a cada valor ordenado, para la variable módulo de ruptura con los datos originales (Figura 3a) y una vez sustituido los valores anómalos (Figura 3b).

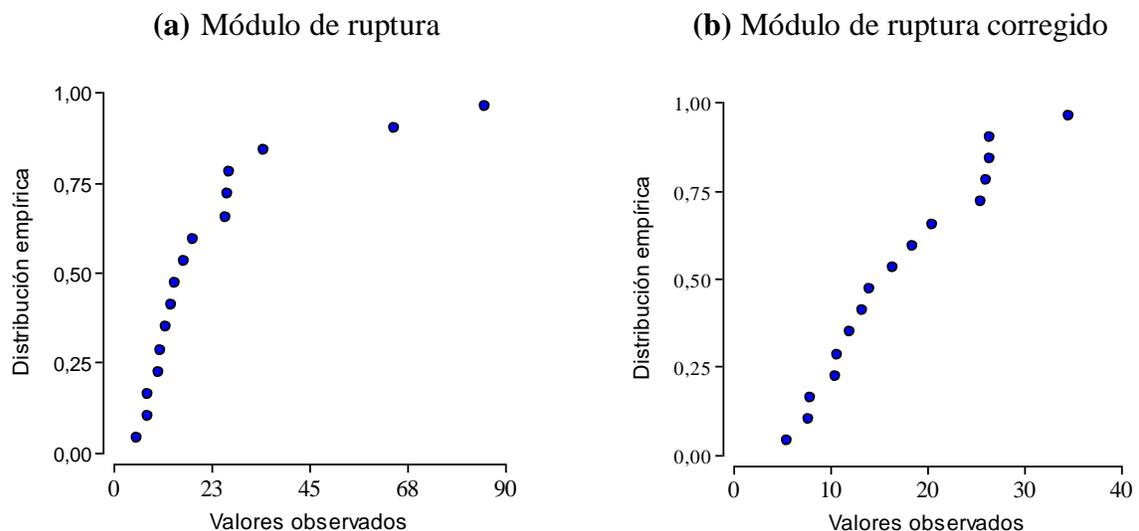


Figura 3. Distribución empírica de la variable módulo de ruptura para los datos originales (a) y luego de corregida (b)

Después de la determinación de los valores anómalos se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks modificado por Mahibbur y Govindarajulu (1997), para probar si las variables en estudio presentaban una distribución normal. Las hipótesis de la prueba son: H_0 : las observaciones tienen distribución normal; versus H_1 : las observaciones no tienen distribución normal. Se rechazó el supuesto de distribución normal cuando $p < 0,05$. Se encontró que las variables: conductividad hidráulica saturada, módulo de ruptura, arena muy fina, arena gruesa y arena muy gruesa, no presentaron distribución normal, por lo que se procedió a realizar las transformaciones propuestas por Webster y Oliver (1990), las cuales fueron: raíz cuadrada, logaritmo decimal, logaritmo natural y recíproco, encontrando que la que más se ajustó a una distribución normal, fue la de logaritmo decimal; sin embargo, las variables arena muy fina, arena gruesa y arena muy gruesa, no lograron ajustarse con ninguna de las transformaciones.

En la figura 4, se toma como ejemplo el módulo de ruptura, pudiéndose apreciar la distribución de los datos originales, y la distribución luego de realizar la transformación por medio de logaritmo decimal.

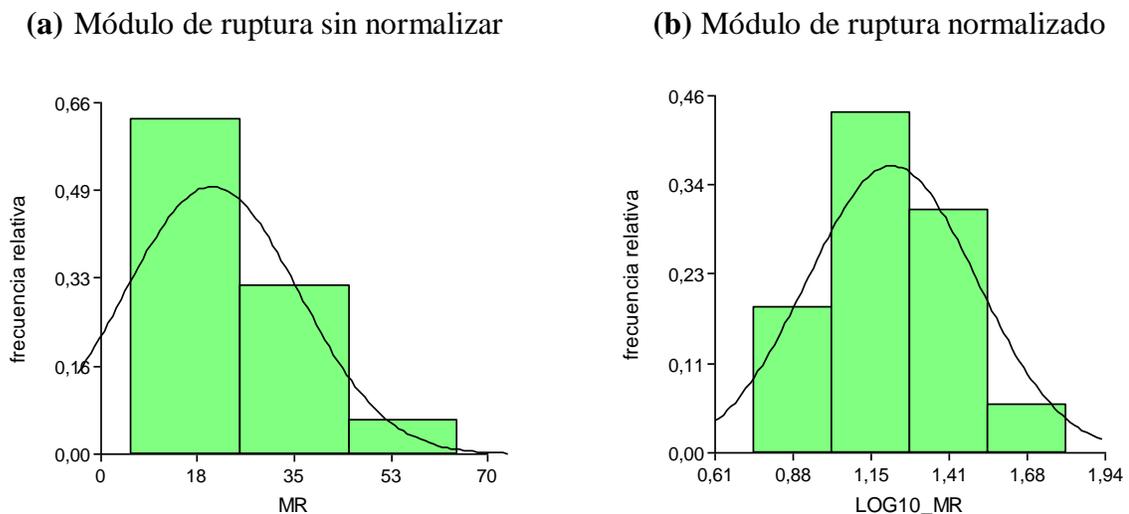


Figura 4. Histograma de la distribución de los datos de módulo de ruptura sin normalizar (a) y normalizados (b)

Para comprobar la homocedasticidad (homogeneidad de la varianza) de los datos, se realizó un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos, aquellos gráficos donde se observó una nube de puntos sin patrón alguno (patrón aleatorio), se consideraron que cumplían con el supuesto de homogeneidad de varianzas (Di Rienzo *et al.*, 2008). Se comprobó que todas las variables evaluadas en este estudio cumplían con el supuesto de homocedasticidad.

Una vez cumplidos los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó un análisis de varianza el cual permitió determinar si los diferentes tratamientos mostraban diferencias estadísticas significativas o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren (Tejedor, 1999). Para las variables que no pudieron ajustarse a una distribución normal se les realizó un análisis de varianza no paramétrico, propuesto por Kruskal y Wallis (1952), el cual permite comparar las esperanzas de 2 o más distribuciones sin necesidad de realizar el supuesto de que los términos de error se distribuyen normalmente.

Para el análisis multivariado, se construyó una matriz de correlación de Pearson para establecer el nivel de interrelación entre las variables del cultivo, entre las variables físicas del suelo y entre las variables del suelo y del cultivo, determinando cuáles de las variables evaluadas en el suelo inciden mayormente con los variables que describen la productividad del cacao. Todos estos análisis fueron realizados mediante el software estadístico InfoStat versión 2008.

Con el propósito de facilitar el manejo de la información generada, se realizó un análisis exploratorio de los datos, por medio de la aplicación del análisis de componentes principales (ACP) propuesto por Pla (1986), haciendo uso del software estadístico Statistica 6.0, a partir del cual se obtuvo un número reducido de nuevas variables no correlacionadas (componentes) que explique la mayor parte de la variabilidad, las mismas son obtenidas por orden decreciente de importancia, por medio de la combinación lineal de las variables originales y los vectores asociados a los componentes (pesos), por medio de la fórmula:

$$CP = A_{11} X_1 + A_{12} X_2 + \dots A_{ij} X_j$$

Donde CP = Componente principal; A_{ij} = coeficiente (eigenvector); y X_j = variable. De los componentes principales generados, se seleccionaron aquellos cuyos valores propios fueron superiores a uno y que explicaran al menos el 75% de la variabilidad total, de acuerdo al criterio propuesto por Pla (1986).

Para completar el ACP, se construyeron gráficos de dispersión entre los componentes principales de mayor capacidad explicativa de los datos, con el fin de realizar interpretaciones respecto al comportamiento entre las variables y la distribución de las observaciones, pudiendo determinar grupos de individuos con características diferenciales (Demey *et al.*, 1994).

Al mismo tiempo, se realizó un análisis discriminante que permitió 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 evaluadas (Johnson, 2000; Rencher, 1998; 2002). El análisis discriminante permitió además determinar las variables responsables de esa conformación de grupos, estableciendo las variables más limitantes en los sitios malos y así adecuar el manejo para superar esas limitaciones, constituyendo recomendaciones de manejo sustentadas en información bibliográfica y consulta a expertos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas del suelo

Distribución de tamaño de partículas y clase textural

En el cuadro 2, se presenta la distribución de tamaño de partículas (DTP) para los 4 puntos de cada lote evaluado, para ambas profundidades de muestreo, en el que se puede observar que existe un contenido muy bajo de partículas correspondiente a la fracción arcilla para todos los sitios de muestreo. Mientras que en la fracción limo, se obtuvo valores que oscilan entre 15 y 19 % en la capa superficial y entre 4 y 15 % en la capa subsuperficial, por lo que se observa una tendencia a disminuir a medida que se profundiza en el perfil. La arena fue la fracción granulométrica que presentó mayor predominio en ambos lotes, obteniéndose valores por encima del 75 % en todos los sitios de muestreo a ambas profundidades, mostrando una tendencia al aumento en las capas subsuperficiales.

Cuadro 2. Distribución del tamaño de partículas

	Punto	Prof. (cm)	% A	% L	% a	% amf	% af	% am	% ag	% amg	CT	MOS ¹ (%)
Lote Bueno	1	0 - 15	4	19	77	12	22	24	14	5	Fa	1,47
		15-40	5	12	83	13	25	21	13	11	Fa	0,36
	2	0 - 15	3	15	82	10	20	22	17	13	Fa	1,30
		15-40	4	10	86	12	24	24	16	11	aF	0,29
	3	0 - 15	4	12	84	8	15	22	21	19	aF	0,99
		15-40	2	4	94	7	19	21	16	31	a	0,12
	4	0 - 15	4	20	76	9	21	23	14	9	Fa	1,66
		15-40	4	9	88	7	23	27	16	14	aF	0,38
Lote Malo	5	0 - 15	3	15	82	33	30	14	3	1	Fa	0,73
		15-40	5	11	84	30	25	21	7	1	aF	0,20
	6	0 - 15	2	15	83	48	23	8	2	1	Fa	1,58
		15-40	3	12	85	48	27	7	2	1	aF	0,23
	7	0 - 15	4	21	75	23	36	13	3	1	Fa	1,25
		15-40	3	13	84	29	39	13	2	1	aF	0,34
	8	0 - 15	3	20	77	27	28	17	6	2	Fa	1,15
		15-40	5	15	80	27	28	17	6	2	Fa	0,23

A: Arcilla (< 2µm); L: Limo (2-50µm); a: Arena (50-2000µm); amf: Arena muy fina (50-100µm); af: Arena fina (100-250µm); am: Arena media (250-500µm); ag: Arena gruesa (500-1000µm); amg: Arena muy gruesa (1000-2000µm); CT: Clase textural; Fa: Franco Arenosa; aF: Areno Francosa; a: Arenosa; MOS: materia orgánica del suelo; ¹Fuente: Trujillo, (2015).

Al evaluar la distribución de las arenas (amf, af, am, ag y amg) mediante el análisis de la varianza, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para todas éstas fracciones en ambos lotes. Tal como se puede apreciar en el cuadro 2, en el LM existe mayor proporción de arena fina y muy fina para todos los puntos de muestreo, a ambas profundidades, en comparación con el LB, caso contrario ocurrió con la arena gruesa y muy gruesa, donde la proporción fue considerablemente menor en el LM comparados con los observados en el LB.

La suma de las fracciones de L+af+amf en el LB representa en promedio el 43 %, mientras que para el LM es de 78 % (Cuadro 2, Figura 5), lo que puede repercutir en el comportamiento de algunas de las características físicas del suelo. El hecho de que exista una proporción alta (>75%) de las partículas con diámetro equivalente entre 2-250 μm (L, af y amf) en el LM, le puede conferir a este suelo baja estabilidad estructural y mayor susceptibilidad a procesos de sellado, encostrado y compactación, por la baja cohesión y alta separabilidad que poseen estas partículas (Pla, 1978), lo cual coincide con Poesen (1986), quien señala que este tipo de partículas requieren muy poca energía para separarse de los agregados.

La textura del suelo se determinó a partir de la distribución de tamaño de partículas, resultando la textura franco arenosa (Fa) la que predominó en los lotes con un 56%, seguida de la clase areno francosa (aF) con 38% y un 6% de las muestras presentó textura arenosa (a). Se destaca además que los contenidos de materia orgánica (MO) son bajos en todos los puntos evaluados, especialmente en los horizontes subsuperficiales.

Resultados similares encontraron Jiménez *et al.* (2012), en el estudio de la capacidad de uso de los suelos en agroecosistemas de frágil equilibrio ecológico de la localidad de Cuyagua, sobresaliendo texturas medias (F) a gruesas (aF, Fa y a) en la mayoría de los perfiles evaluados.

El predominio de clases texturales gruesas le permite a estos suelos ser muy permeables al aire y al agua y facilita la penetración de las raíces, pero presentan dos importantes limitaciones: la primera es su baja capacidad de retener agua, y la segunda su deficiente capacidad de almacenamiento de nutrientes. Por su parte, Gavande (1973), encontró que los suelos que tienen una mayor tendencia a compactarse presentan generalmente texturas medias a gruesas. Se ha comprobado que en suelos de texturas medias a gruesas cuando se aplican presiones

altas se logra obtener valores más altos de densidad aparente, que en suelos de texturas arcillosas, especialmente cuando los contenidos de limo y/o arena fina son abundantes.

La capacidad limitada de retención de agua y nutrientes que exhiben los suelos de textura gruesa, se encuentra relacionada con la pequeña superficie total del conjunto de sus partículas. La superficie por gramo de suelo es inversamente proporcional al diámetro de las partículas (Thompson y Troeh, 2002). Tal como lo expresaron Hardy (1961) y Sys *et al.* (1993), estos suelos serían marginales para el cultivo de cacao.

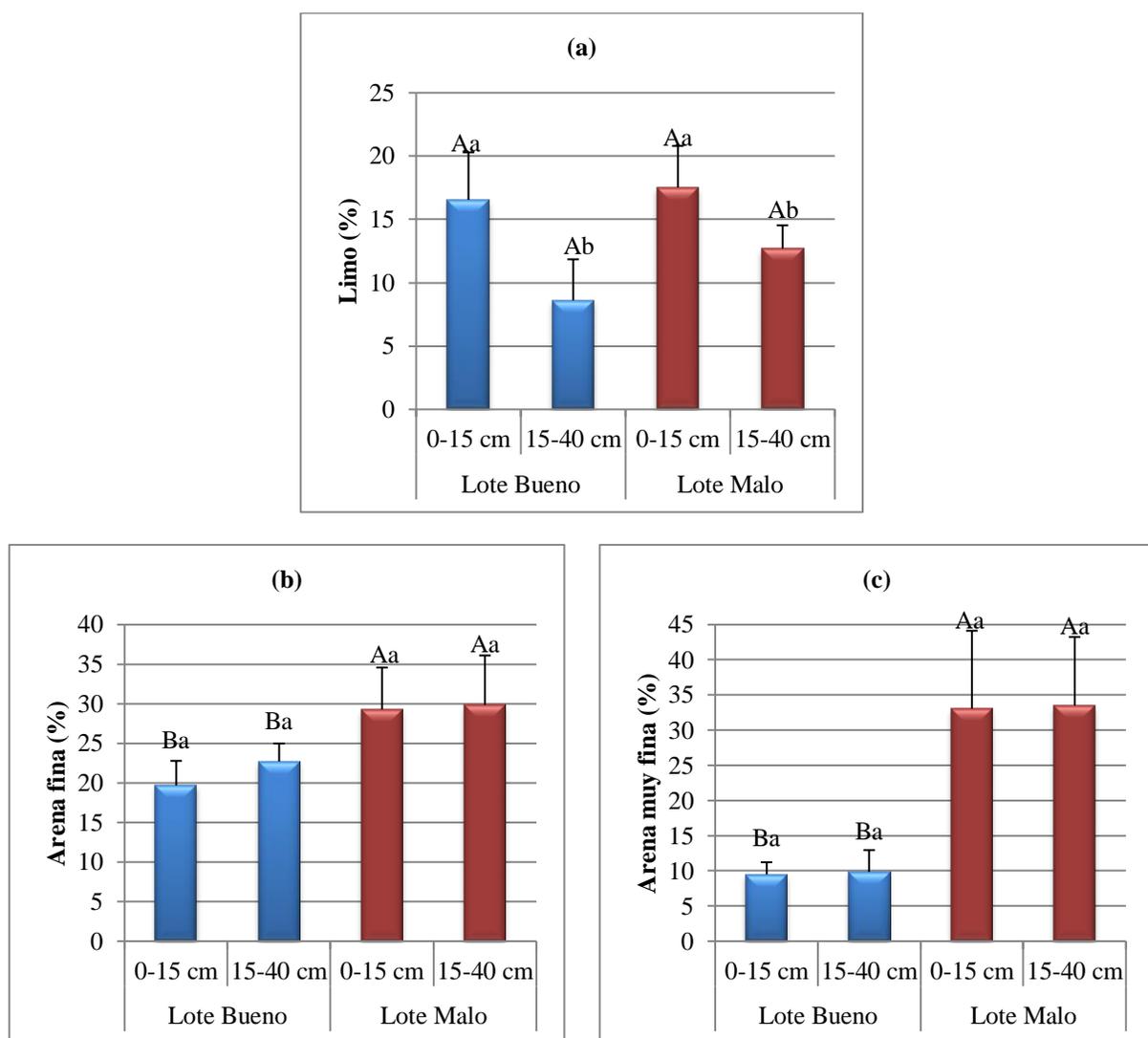


Figura 5. Distribución de las fracciones de limo (a), arena fina (b) y arena muy fina (c) promedios, por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Porosidad total y distribución de tamaño de poros

Para el caso de la porosidad total y el porcentaje de microporos (poros con radio $< 15\mu\text{m}$), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre LB y LM. La porosidad total fue en promedio de 45,63 % ($\pm 5,7$) y 42,47 % ($\pm 1,73$) para el LB y para el LM, respectivamente; mientras que los microporos presentaron valores promedios entre 21,61 ($\pm 5,15$) en el LB y 23,31 % ($\pm 4,46$) en el LM (Figura 6).

Los poros de aireación (poros con radio $> 15\mu\text{m}$), sí presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en ambos lotes, teniendo mayor porcentaje de macroporos en el LB (24% $\pm 3,49$) que en el LM (20,6 % $\pm 2,21$) (Figura 6), valores que se pueden atribuir al arreglo espacial de las arenas finas y muy finas que predominan dentro del perfil del suelo del LM, ocupando espacio poroso, dando como consecuencia un menor espacio para aireación, además de conferirle a éstos una baja capacidad de almacenamiento y gran facilidad para perder agua.

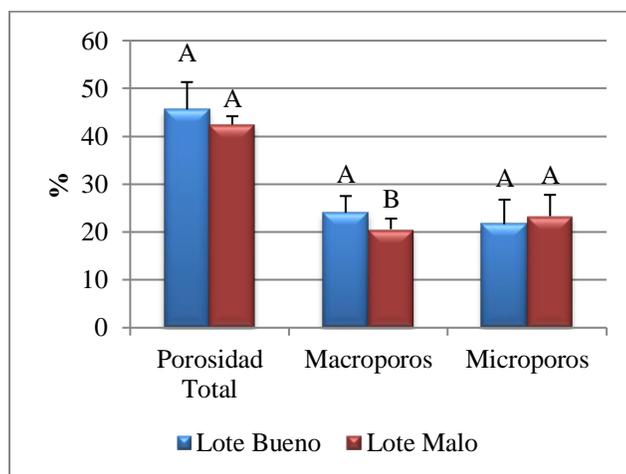


Figura 6. Porosidad total, macroporos y microporos promedios por cada lote evaluado a la profundidad de 0 a 40 cm. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes.

Por otro lado, al evaluar estas mismas variables en profundidad, la porosidad total presentó diferencias estadísticas significativas en el LB, disminuyendo sus valores en las capas inferiores, pasando de 50,15 % ($\pm 3,34$) en la capa superficial a 41,11 % ($\pm 3,21$) en la capa subsuperficial. La misma tendencia se observó para los microporos, pero esta vez para ambos lotes, pasando de 25,88 % ($\pm 2,51$) en la capa superficial a 17,33 % ($\pm 2,61$) en la capa

subsuperficial para LB, y de 25,03 % ($\pm 6,05$) en la capa superficial a 21,59 % ($\pm 1,35$) en la subsuperficial para el LM. Estos resultados también podrían deberse a los contenidos de materia orgánica presente en estos suelos (Cuadro 2), los cuales aunque son bajos, son mayores en los horizontes superficiales respecto a los subsuperficiales. Por su parte los macroporos no presentaron diferencias significativas en profundidad (Figura 7).

Sin embargo, a pesar de estas diferencias, los valores promedios de macroporos estuvieron por encima de los valores que han sido considerados críticos (menores a 10%) para el desarrollo de las plantas (Florentino, 1989), por lo que se puede considerar que en ninguno de los lotes evaluados existe deficiencia de oxígeno que pueda limitar el crecimiento de las raíces.

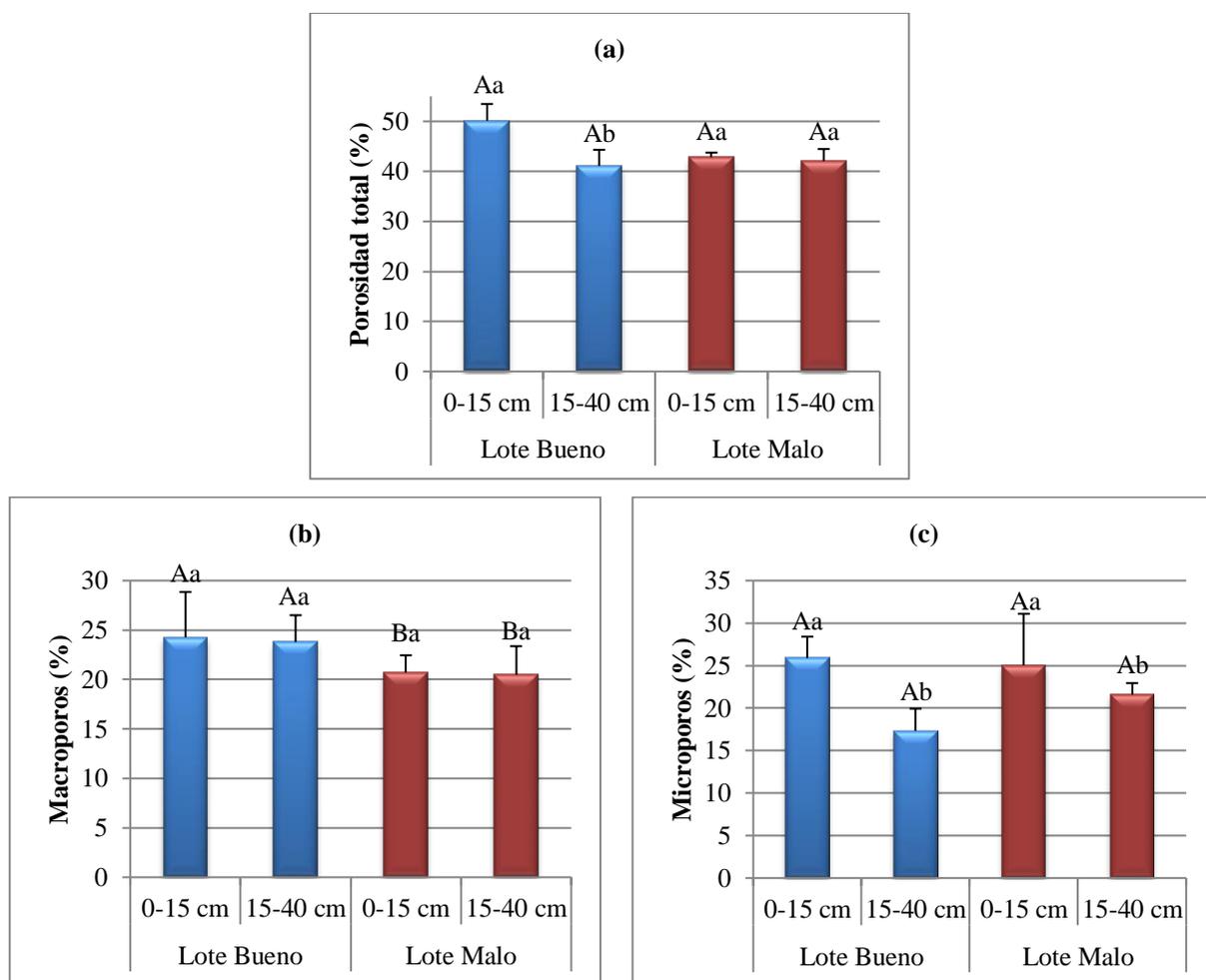


Figura 7. Porosidad total (a), macroporos (b) y microporos (c) promedios, por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Densidad aparente

Al realizar el análisis de varianza evaluando la densidad aparente (D_a) respecto a las dos profundidades muestreadas (0-15 y 15-40 cm), se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) en ambos lotes (Figura 8). Teniendo valores promedios para la primera profundidad de $1,14 (\pm 0,09)$ y $1,18 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3} (\pm 0,05)$ para el LB y LM respectivamente. Mientras que en la capa subsuperficial, esta variable presentó una tendencia general al aumento, con promedio de $1,38 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3} (\pm 0,06)$ en el LB, y para el LM de $1,40 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3} (\pm 0,04)$. Este aumento de la densidad aparente en profundidad se corresponde con la disminución en el espacio poroso en la capa subsuperficial, especialmente en la microporosidad (Figura 7c) y la disminución del contenido de materia orgánica en los horizontes subsuperficiales.

Sin embargo, estos resultados se encuentran por debajo de los valores críticos para la producción de los cultivos en suelos de texturas gruesas (a, Fa, aF) ($> 1,70 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), de acuerdo a los criterios de Florentino (1989), lo cual puede atribuirse a las características mineralógicas de las arenas que predominan en estos suelos.

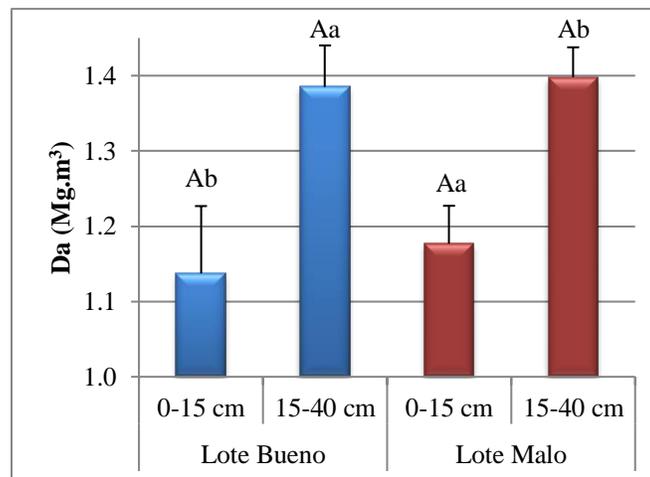


Figura 8. Comportamiento de la densidad aparente promedio por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Conductividad hidráulica saturada

En el análisis estadístico para esta variable, se evidencian diferencias significativas entre los dos lotes ($p < 0,05$), con valores que oscilan entre $82,03 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en promedio para el LM, hasta

429,38 mm.h⁻¹, para el LB. Cabe destacar que en ambos casos se presentaron altos coeficientes de variación (42,62 y 74,45% para el LB y LM, respectivamente), por lo que los datos se encuentran muy dispersos, existiendo gran variabilidad respecto a la media en ambos lotes. Los valores de Ks son superiores a 20 mm.h⁻¹, lo que de acuerdo con Florentino (1998) son valores, que pudiesen comprometer la capacidad de retención de agua en el suelo. Según Ahuja *et al.* (1989), el valor de la conductividad hidráulica en condiciones de saturación está muy relacionado con la porosidad del suelo, en especial con la proporción de macroporos; afirmación que coincide con los resultados obtenidos, ya que para el lote donde se presentó la mayor cantidad de macroporos (LB), es donde se registraron los mayores valores de conductividad hidráulica saturada.

Además, se pudo observar una disminución de la Ks con la profundidad, con valores mayores en los horizontes superficiales que en los subsuperficiales en todos los sitios muestreados (Figura 9). Este comportamiento general, muy posiblemente sea debido al aumento de la densidad aparente en las capas subsuperficiales, tal como lo indica Pla (1993), lo que trae como consecuencia una disminución en el volumen total de poros, con una consecuente disminución en el movimiento del flujo de agua a través del perfil del suelo.

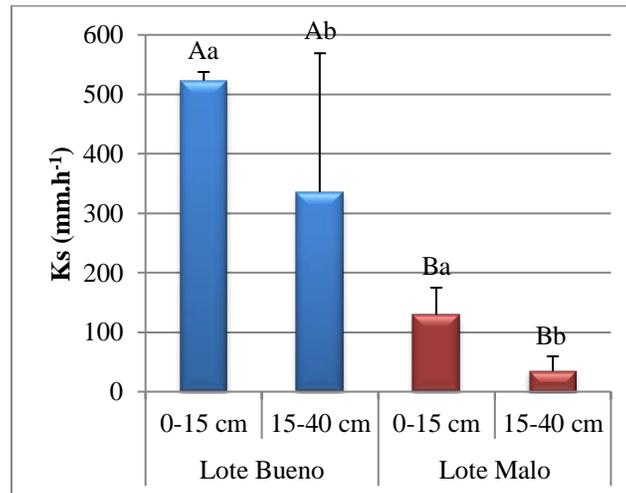


Figura 9. Conductividad hidráulica saturada promedio por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Resistencia mecánica a la penetración y módulo de ruptura

La estadística descriptiva para la resistencia mecánica a la penetración (RMP) arrojó una variabilidad media dentro de los lotes, al presentarse coeficientes de variación por encima del 50% (58,27 y 52,31% para el LB y LM, respectivamente).

Al evaluar los valores que presentó cada lote, se evidencian diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre ellos, con un comportamiento general de aumento a medida que se profundiza en el perfil del suelo, independientemente del lote evaluado. El LM presentó los mayores valores de RMP teniendo en promedio 209,47 kPa ($\pm 64,52$) en los horizontes superficiales y 540,82 kPa ($\pm 111,85$) en los subsuperficiales, frente a 139,78 ($\pm 53,33$) y 343,31 kPa ($\pm 125,25$) que registraron los horizontes superficiales y subsuperficiales respectivamente para el LB (Figura 10). Diferencias que se pueden atribuir a la humedad del suelo, contenido de materia orgánica y distribución y geometría del espacio poroso en ambos lotes.

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 con una plantación de cítricos de cinco años, atribuyendo este efecto a los altos valores de densidad aparente y a la reducción del porcentaje de poros con radio mayor de $15\mu\text{m}$, encontrados en las capas subsuperficiales.

Sin embargo, al calificar los valores de RMP, aplicando los criterios planteados por Florentino (1998) para establecer los niveles de compactación, 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.

Además en ninguno de los lotes se aprecian valores mayores a los considerados por Pla (1993) como valores limitantes para el desarrollo de las raíces de los cultivos, el cual oscila entre 800-5000 kPa.

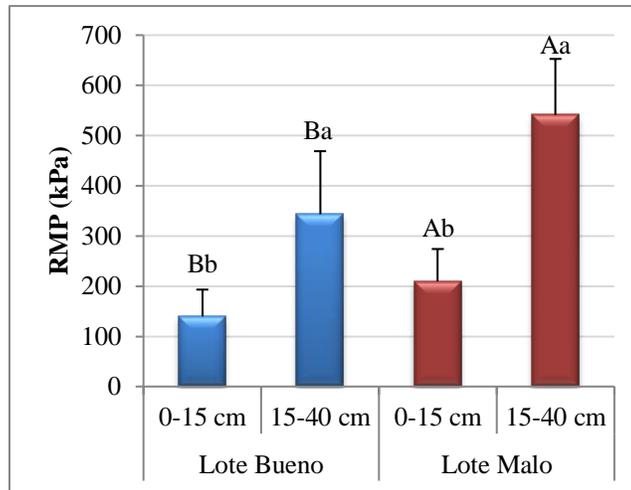


Figura 10. Resistencia mecánica a la penetración promedio por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Al relacionar los valores de RMP en cada uno de los puntos de muestreo con la humedad gravimétrica presente en el suelo al momento de la medición (Figura 11), se evidencia lo expuesto por Bravo (1993), para puntos con menor contenido de humedad, se presentaron los mayores valores de RMP y viceversa.

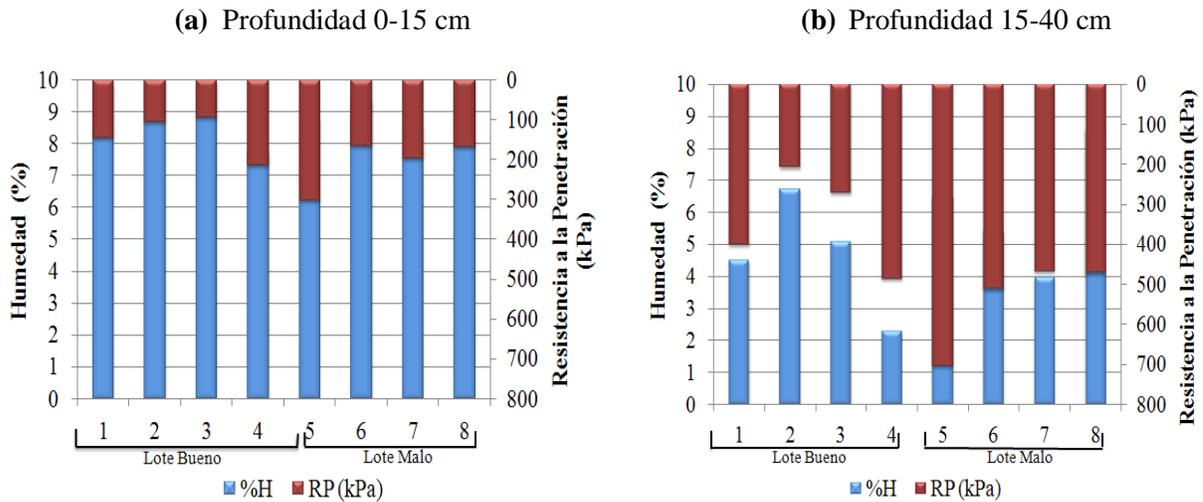


Figura 11. Relación entre la resistencia mecánica a la penetración y la humedad del suelo, para ambas profundidades muestreadas: 0-15cm (a) y 15-40cm (b)

La figura 12 muestra los valores obtenidos de módulo de ruptura (MR) en ambos lotes y para ambas profundidades muestreadas, observándose que existen diferencias significativas ($p < 0,05$).

En el LB se alcanzaron valores promedio de 14,04 kPa ($\pm 9,43$), mientras que en el LM de 26,09 kPa ($\pm 16,84$), caso similar ocurrió al evaluar cada lote en profundidad, observándose valores menores de MR en las capas superficiales comparados con los valores obtenidos en las subsuperficiales (Figura 12).

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 las raíces. Estos resultados pueden estar relacionados con los obtenidos en la densidad aparente, distribución de tamaño de poros y contenido de arcilla.

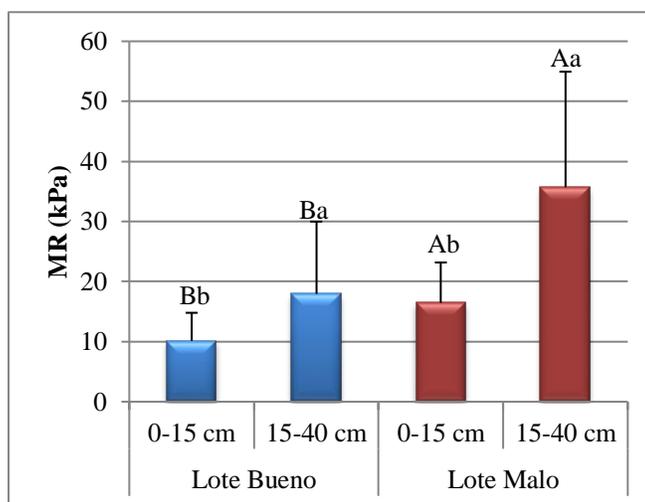


Figura 12. Módulo de Ruptura promedio por lote y profundidad. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes, letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por profundidad dentro de un mismo lote.

Productividad del cultivo

Algunas de las variables de productividad del cultivo de cacao evaluadas, presentaron diferencias estadísticamente significativas entre lotes, tal es el caso, del número de mazorcas por planta (Figura 13a), en la cual se obtuvo un promedio mayor para el LB ($19,3 \pm 5,89$) con respecto al LM ($11,69 \pm 1,34$).

Estos promedios contrastan con los indicados por Ramos *et al.* (2004) como valor óptimo de producción, el cual se encuentra alrededor de 35 mazorcas/árbol, llegando hasta 100 mazorcas/árbol/año. En el presente trabajo se puede observar que los valores obtenidos en cada lote se encuentran por debajo del considerado óptimo, indicativo de que en general existe baja capacidad de producción, lo cual se puede atribuir a factores tales como manejo de la plantación, edad de las plantas, densidad de siembra, variabilidad genética presente en los árboles o a características edáficas que están limitando la producción del cultivo.

En cuanto al número de semillas por mazorca, también se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$), con un número de semillas promedio de 35,03 ($\pm 4,67$) y 27,55 ($\pm 3,71$) para el LB y LM, respectivamente (Figura 13b).

Ayestas *et al.* (2013), al evaluar 100 árboles promisorios de cacao en fincas orgánicas de Nicaragua, con características de manejo muy similares a las de la Hacienda Cuyagua, reportaron un promedio de 39 semillas por mazorca, resultados que se acercan a los obtenidos en esta investigación para el LB.

Sin embargo, según lo descrito por Braudeau (1970), el número de semillas por mazorca está entre 25 y 50, por lo que en ambos lotes la cantidad de semillas se encuentra dentro de los límites aceptables de productividad. 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.

El peso fresco de semilla, no presentó variaciones importantes en los lotes, considerándose que las medias son estadísticamente iguales, con valores de 3,26g ($\pm 0,6$) para LB y 4,15g ($\pm 0,8$) para el LM (Figura 13c). Cabe destacar que los valores obtenidos son muy similares a los reportados por Angulo *et al.* (2000), quienes realizaron la caracterización física de semillas de cacao, en la localidad de Cumboto, ubicada dentro de la zona cacaotera de la región centro norte costera, la misma a la que pertenece la Hacienda Cuyagua, obteniendo como peso fresco de semilla valores promedios de 4,34, 3,02 y 3,18 g para cacaos tipo Criollos, Forasteros amazónicos y Trinitarios, respectivamente.

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).

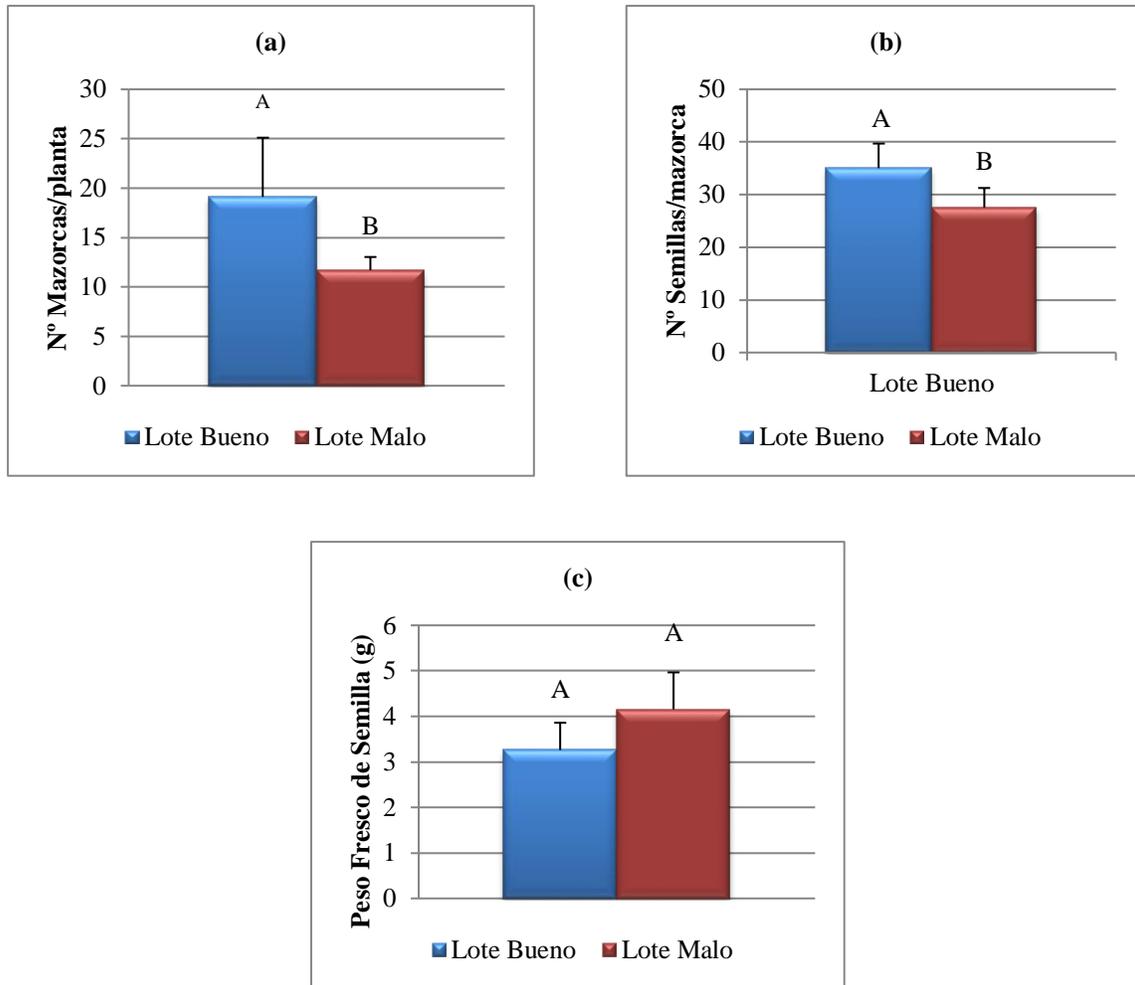


Figura 13. Número de mazorcas por planta (a), número de semillas por mazorca (b) y peso fresco de semilla (c) en cada lote evaluado. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes.

En el caso del índice de almendras (IA), tampoco se encontraron diferencias significativas, teniendo promedios de $1,6 (\pm 0,29)$ y $2,04 (\pm 0,4)$ para el LB y LM, respectivamente (Figura 14a), valores superiores a los requerimientos mínimos agronómicos e industriales, el cual se sitúa, según Arciniegas (2005), en un (1) gramo. Dado que el IA es un indicador de rendimiento, es de gran utilidad para la selección de clones de cacao para 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.

El índice de mazorca (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 significativas ($p > 0,05$), con valores que oscilan entre 14,5 y 23,9 para el LB, con promedio de 18,5 ($\pm 3,95$); y entre 16,8 y 20,9 para el LM con promedio de 19,06 ($\pm 1,92$) (Figura 14b). Ampuero (1960), indica 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 kilogramos de cacao seco no es aceptable, a menos que posea otras características sobresalientes, por lo que de acuerdo a este autor, los resultados obtenidos en esta investigación para este indicador, se encuentra dentro de los parámetros aceptables de producción.

Al determinar la densidad de plantación para cada lote evaluado, no se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$), obteniendo un valor promedio de 491,25 ($\pm 117,5$) y 631,25 ($\pm 108,73$) plantas.ha⁻¹ para el lote bueno y malo, respectivamente; los cuales son considerados bajos de acuerdo a los valores recomendados por Paredes (2013), el cual es de aproximadamente 1.100 plantas.ha⁻¹, para distancias de siembra de 3x3 m, con lo que se garantiza una mejor distribución de la copa así como de las raíces. Por lo que se puede inferir, que la diferencia en algunos de los indicadores de rendimiento, no se debe a competencia entre plantas.

Con base a los resultados de la evaluación del cultivo se realizó una estimación del rendimiento promedio de cada uno de los lotes, donde se obtuvieron 505,33 kg.ha⁻¹ ($\pm 145,2$) para el LB y 329,06 kg.ha⁻¹ ($\pm 110,4$) para el LM (Figura 14c). Al realizar el análisis de varianza para esta variable, la prueba nos arroja que no existen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$), lo cual se puede atribuir a la alta variabilidad para rendimiento existente dentro de cada lote, lo cual se puede verificar observando los altos valores de la desviación estándar.

En todo caso, el rendimiento del LM está ligeramente por debajo del rendimiento promedio en el país (335 kg.ha⁻¹, para el año 2014), mientras que el LB lo supera en un 50,7% aproximadamente.

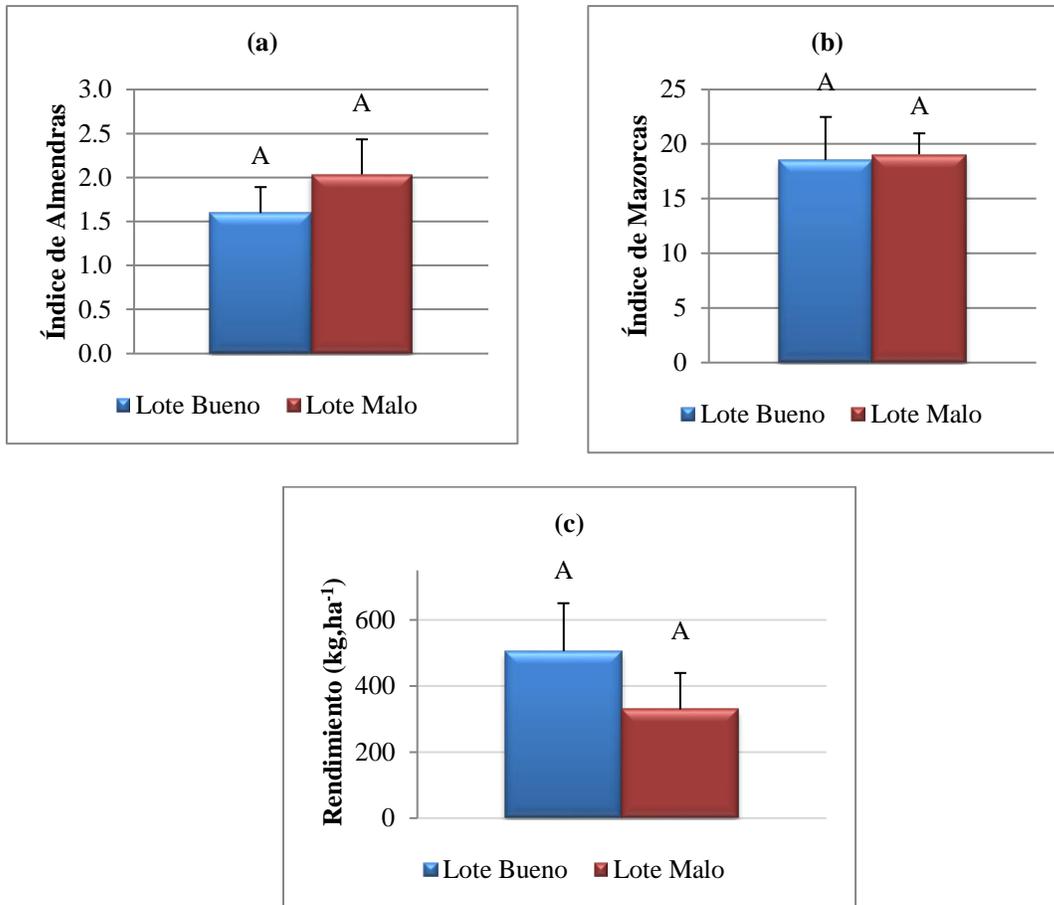


Figura 14. Índice de almendras (a), Índice de Mazorca (b) y rendimiento (c) por lote. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre los lotes.

Relación entre las características físicas del suelo y las variables de productividad del cultivo de cacao

En la matriz de correlación de Pearson, para categorizar el nivel de correlación entre las variables se consideró, una relación perfecta de ser igual a uno, alta superior a 0,7, media entre 0,7 y 0,5 y baja menor a 0,5 (Cuadro 3). Respecto a las variables físicas del suelo, de la matriz generada se puede observar, que existe una correlación negativa con coeficientes y grado de significación altos, entre las variables arenas finas y arenas muy finas con la porosidad total, la macroporosidad y la conductividad hidráulica saturada, especialmente en los horizontes subsuperficiales, lo que se puede interpretar como que los suelos que tienen un predominio de estas fracciones, tienden a tener una menor porosidad, específicamente menos macroporos, trayendo como consecuencia una disminución en la velocidad de movimiento del agua dentro del perfil (Ks).

Cuadro 3. Matriz de correlación de las variables físicas del suelo y las variables de productividad del cultivo

	PT1	PT2	Macro1	Macro2	Micro1	Micro2	Da1	Da2	Ks1	Ks2	MR1	MR2	RPMP1	RPMP2	A1	A2	L1
PT1	1																
PT2	0,18	1															
Macro1	0,79	0,55	1														
Macro2	0,71	0,48	0,63	1													
Micro1	0,13	-0,18	-0,15	-0,05	1												
Micro2	-0,59	0,39	-0,17	-0,62	-0,11	1											
Da1	-0,32	-0,32	-0,21	-0,03	0,09	-0,25	1										
Da2	-0,2	-0,45	-0,24	-0,23	0,52	-0,16	0,74	1									
Ks1	0,83	-0,23	0,48	0,52	3,20E-03	-0,75	-0,33	-0,17	1								
Ks2	0,52	-0,34	-0,06	0,53	0,29	-0,87	-0,09	-0,02	0,7	1							
MR1	-0,67	0,1	-0,32	-0,15	-0,38	0,25	0,43	-0,08	-0,54	-0,37	1						
MR2	-0,58	-0,08	-0,33	-0,58	0,5	0,55	0,29	0,45	-0,6	-0,52	0,38	1					
RPMP1	-0,33	0,16	-0,1	-0,44	-0,29	0,6	-0,11	-0,38	-0,56	-0,6	0,18	0,11	1				
RPMP2	-0,53	0,13	-0,33	-0,61	-0,19	0,76	-0,22	-0,35	-0,68	-0,62	0,2	0,26	0,94	1			
A1	0,21	0,1	0,08	0,34	0,14	-0,27	-0,19	-0,51	0,21	0,38	0,29	-2,10E-03	0,09	0,02	1		
A2	-0,28	-0,27	-0,08	-0,71	0,3	0,5	0,08	0,25	-0,31	-0,58	0,07	0,74	0,44	0,46	-0,01	1	
L1	-0,03	0,61	0,44	0,08	-0,11	0,47	-0,18	-0,39	-0,22	-0,53	0,47	0,43	0,25	0,21	0,44	0,37	1
L2	-0,66	0,15	-0,15	-0,58	-0,05	0,74	0,23	0,15	-0,68	-0,84	0,64	0,82	0,34	0,43	-0,08	0,68	0,66
af1	-0,01	-0,58	-0,41	-0,13	0,08	-0,38	0,2	0,45	0,17	0,42	-0,48	-0,39	-0,24	-0,19	-0,57	-0,34	-0,99
a2	0,6	-0,04	0,14	0,65	-0,04	-0,73	-0,21	-0,19	0,63	0,82	-0,52	-0,86	-0,39	-0,47	0,07	-0,81	-0,62
amf1	-0,83	0,02	-0,58	-0,73	-0,21	0,78	0,04	0,13	-0,79	-0,66	0,26	0,37	0,45	0,65	-0,59	0,23	-0,1
amf2	-0,87	0,07	-0,56	-0,68	-0,28	0,78	0,1	0,11	-0,81	-0,69	0,4	0,39	0,39	0,59	-0,55	0,19	-0,01
af1	-0,65	0,31	-0,17	-0,31	-0,33	0,6	0,36	-0,11	-0,81	-0,73	0,8	0,45	0,66	0,63	0,13	0,34	0,55
af2	-0,6	0,48	-0,08	-0,06	-0,44	0,49	0,3	-0,17	-0,66	-0,6	0,9	0,35	0,29	0,31	0,12	0,02	0,62
am1	0,8	-0,22	0,49	0,46	0,35	-0,68	-0,16	-0,07	0,83	0,62	-0,42	-0,23	-0,39	-0,55	0,53	0,04	0,05
am2	0,83	-0,14	0,61	0,41	0,23	-0,56	-0,09	-0,08	0,69	0,4	-0,51	-0,32	-0,03	-0,28	0,39	0,15	0,02
ag1	0,83	-0,25	0,39	0,61	0,32	-0,86	-0,14	0,05	0,92	0,84	-0,57	-0,48	-0,66	-0,77	0,27	-0,35	-0,31
ag2	0,91	-0,22	0,55	0,54	0,25	-0,76	-0,19	-0,03	0,92	0,68	-0,65	-0,48	-0,42	-0,6	0,28	-0,15	-0,2
amg1	0,78	-0,16	0,34	0,71	0,28	-0,89	-0,01	0,14	0,8	0,86	-0,6	-0,6	-0,67	-0,78	0,09	-0,57	-0,5
amg2	0,71	-0,16	0,18	0,66	0,32	-0,83	-0,21	-0,06	0,77	0,96	-0,56	-0,59	-0,58	-0,64	0,31	-0,59	-0,47
MPta	0,67	0,16	0,57	0,27	-0,14	-0,13	-0,79	-0,66	0,71	0,23	-0,41	-0,38	-0,06	-0,12	0,38	0,01	0,31
SMaz	0,5	-0,12	0,06	0,5	-0,14	-0,63	-0,49	-0,54	0,73	0,82	-0,24	-0,7	-0,39	-0,4	0,48	-0,63	-0,27
Pfs	-0,58	-0,23	-0,48	-0,52	0,52	0,35	0,53	0,83	-0,6	-0,35	0,1	0,74	-0,1	0,07	-0,52	0,39	-0,18
IA	-0,58	-0,23	-0,48	-0,52	0,52	0,35	0,53	0,83	-0,6	-0,35	0,1	0,74	-0,1	0,07	-0,52	0,39	-0,18
IM	0,24	0,62	0,65	0,15	-0,38	0,4	-0,27	-0,56	-0,12	-0,54	0,08	-0,08	0,66	0,47	0,24	0,27	0,68
Pob	-0,26	0,3	0,21	-0,26	-0,11	0,54	0,35	0,08	-0,62	-0,78	0,31	0,41	0,74	0,6	-0,06	0,58	0,48
REND	0,6	0,09	0,56	0,23	-0,49	-0,16	-0,64	-0,7	0,66	0,12	-0,32	-0,59	0,12	-0,02	0,23	-0,05	0,18

PT: Porosidad total, Macro: Macroporos, Micro: Microporos, Da: densidad aparente, Ks: Conductividad Hidráulica, MR: Modulo de ruptura, RMP: Resistencia mecánica a la penetración, A: Arcilla, A: Arena, L: Limo 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).

Cuadro 3. (Continuación) Matriz de correlación de las variables físicas del suelo y las variables de productividad del cultivo

	L2	a1	a2	amf1	amf2	af1	af2	am1	am2	ag1	ag2	amg1	amg2	MPta	SMaz	Pfs	IA	IM	Pob	REND
L2	1																			
a1	-0,59	1																		
a2	-0,98	0,56	1																	
amf1	0,52	0,19	-0,47	1																
amf2	0,59	0,1	-0,52	0,98	1															
af1	0,75	-0,53	-0,69	0,47	0,55	1														
af2	0,7	-0,59	-0,56	0,38	0,51	0,88	1													
am1	-0,45	-0,14	0,35	-0,93	-0,96	-0,58	-0,58	1												
am2	-0,45	-0,08	0,32	-0,82	-0,88	-0,41	-0,58	0,88	1											
ag1	-0,75	0,24	0,69	-0,87	-0,9	-0,84	-0,72	0,88	0,71	1										
ag2	-0,68	0,14	0,58	-0,88	-0,93	-0,75	-0,75	0,93	0,89	0,94	1									
amg1	-0,87	0,44	0,84	-0,75	-0,78	-0,82	-0,68	0,68	0,57	0,93	0,84	1								
amg2	-0,9	0,38	0,88	-0,73	-0,77	-0,81	-0,68	0,68	0,52	0,9	0,79	0,94	1							
MPta	-0,28	-0,35	0,22	-0,53	-0,55	-0,44	-0,38	0,63	0,56	0,49	0,61	0,26	0,35	1						
SMaz	-0,75	0,16	0,77	-0,57	-0,57	-0,61	-0,41	0,52	0,3	0,67	0,56	0,62	0,79	0,57	1					
Pfs	0,48	0,25	-0,49	0,55	0,54	0,19	0,11	-0,46	-0,48	-0,4	-0,49	-0,3	-0,41	-0,76	-0,74	1				
IA	0,48	0,25	-0,49	0,55	0,54	0,19	0,11	-0,46	-0,48	-0,4	-0,49	-0,3	-0,41	-0,76	-0,74	1	1			
IM	0,27	-0,66	-0,29	-0,08	-0,08	0,48	0,34	0,03	0,32	-0,28	-0,02	-0,36	-0,38	0,4	-0,23	-0,46	-0,46	1		
Pob	0,61	-0,43	-0,65	0,29	0,29	0,78	0,49	-0,31	0,04	-0,62	-0,39	-0,61	-0,72	-0,29	-0,79	0,22	0,22	0,7	1	
REND	-0,32	-0,21	0,27	-0,42	-0,44	-0,3	-0,29	0,48	0,54	0,37	0,54	0,19	0,22	0,9	0,53	-0,86	-0,86	0,5	-0,15	1

PT: Porosidad total, Macro: Macroporos, Micro: Microporos, Da: densidad aparente, Ks: Conductividad Hidráulica, MR: Modulo de ruptura, RMP: Resistencia mecánica a la penetración, A: Arcilla, a: Arena, 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).

Por otro lado las mismas variables (af, amf) presentaron correlación positiva con el MR y la RMP, lo que refuerza lo discutido en el análisis univariado, ya que en el lote donde se registraron los menores valores de MR y RMP, era el mismo que tenía menores porcentajes de éstas fracciones granulométricas (LB). El aumento de las fracciones de arena media, gruesa y muy gruesa, favorecen la permeabilidad dentro del perfil del suelo, correlacionándose positivamente con la Ks.

Por su parte, la densidad aparente presentó coeficientes de correlación bajos con todas las demás variables físicas del suelo.

En relación con las variables de productividad del cultivo, debido a que éstas dependen una de la otra para sus cálculos, era de esperarse altos coeficientes de correlación entre ellas, apreciándose en la matriz valores mayores a 0,7 para la mayoría de las variables. El número de mazorcas por planta y semillas por mazorcas presentaron una correlación inversa con el peso fresco de semilla e índice de almendra (aquellos árboles que registraron menor número de mazorcas, y a su vez, menor número de semillas, tendían a tener almendras más pesadas), éstas mismas variables fueron las que mejor se relacionaron con el rendimiento, con una correlación positiva, explicando así el aumento en el rendimiento en el LB donde se registraron los mayores valores para éstas variables.

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, con altas probabilidades de ocurrencia. Las variables del suelo que favorecen el número de mazorcas por planta y el número de semillas por mazorca, con un consecuente aumento en el rendimiento son PT, Ks y la proporción de am, ag y amg, con valores de correlación positiva. Mientras que la Da, los microporos, la proporción de amf y el MR se correlacionaron negativamente con el número de semillas por mazorca, especialmente en la capa subsuperficial.

De éstas variables, sólo Da y MR presentaron coeficientes de correlación negativa con el rendimiento, valores por encima del valor crítico de éstas variables pueden provocar un mal desarrollo y disminuir el crecimiento de las raíces dentro del perfil del suelo afectando negativamente la productividad del cultivo.

A partir de la matriz de correlación, se realizó el Análisis de Componentes Principales (ACP), permitiendo reducir el número de variables que ejercen mayor influencia sobre el comportamiento del suelo y el rendimiento del cultivo, generando nuevas variables artificiales o componentes principales (CP) que facilitan la interpretación. En el cuadro 4, se puede observar el valor propio y el acumulado de la varianza total para los 7 componentes principales generados. Dado a que en los primeros 3 CP se acumula más del 75 % de la varianza total, se consideró seleccionar 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.

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

La representación gráfica del porcentaje de variación aportado por cada componente, se puede observar en la figura 15. El gráfico permite evidenciar de forma más clara, la relación que guardan los componentes principales respecto a la varianza explicada por cada uno de ellos, observándose como los sucesivos al tercer componente, aportan varianzas cada vez más pequeñas.

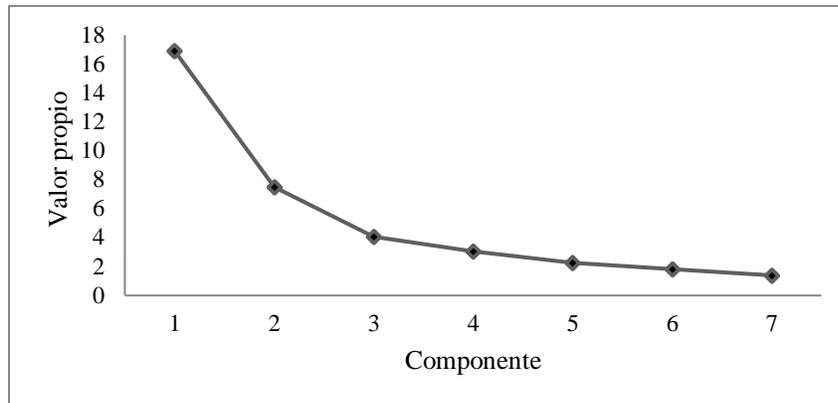


Figura 7. Variación explicada por los componentes principales

En el cuadro 5, se muestran los coeficientes de las variables en los 3 primeros CP resaltando los coeficientes de mayor valor (absoluto), que son los de las variables con mayor peso dentro de cada componente. Evidentemente la mayoría de las variables están asociadas al CP₁ que es el que acumula la mayor varianza total, agrupando las variables del suelo relacionadas con PT y DTP, especialmente para la capa subsuperficial, Ks, MR, RMP para ambas profundidades muestreadas y las variables que representan la proporción de la mayoría de las fracciones granulométricas presentes en el suelo; además agrupa la variable de semillas por mazorcas 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 (mazorcas/ planta, peso fresco de semilla, IA, IM y rendimiento) con la Da y los contenidos de arena, limo y arcilla para la capa superficial como variables del suelo. El CP₃ agrupa la variabilidad no explicada en las primeras dos componentes, arrojando escasa asociación de variables, teniendo solo los microporos de la capa superficial con el contenido de arcilla en la capa subsuperficial.

En la figura 16, se muestra la proyección del CP₁ vs CP₂, donde se ubican los 8 puntos de muestreo, formando dos grupos con comportamientos contrastantes; al comprobar cual lote representaba cada punto de la representación gráfica, se encontró que los primero 4 puntos correspondían al LB, y se ubicaron entre el primer y cuarto cuadrante, con una valoración positiva respecto al CP₁, mientras que los puntos correspondientes al LM (del 5 al 8) se ubicaron en el otro extremo, entre el segundo y tercer cuadrante, con valoración negativa para el CP₁, por lo cual se puede comprobar que de acuerdo a la correlación existente entre las

variables físicas del suelo y las de productividad del cultivo, hay una clara separación entre el LB y LM.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de las variables físicas del suelo y productividad del cultivo, para los primeros 3 componentes principales

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, 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)

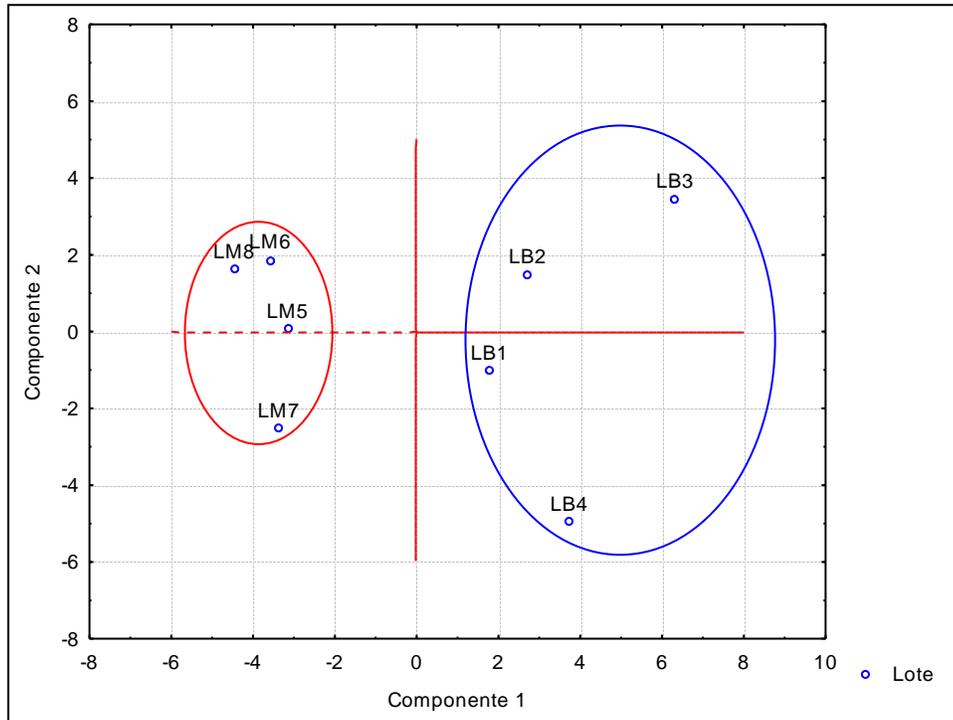


Figura 8. Proyección de los componentes principales 1 y 2 mostrando los puntos evaluados por cada lote.

La figura 17, muestra la proyección de los mismos componentes, pero representando gráficamente todas las variables, de manera que se puede discriminar cuales variables están más asociadas a esta diferenciación de lotes, evidentemente las variables que presentaron una mayor asociación con el CP₁ son las que poseen más peso en esta separación. De acuerdo a este gráfico se puede decir que las variables responsables de la separación de los puntos de muestreo del suelo del LB son PT, especialmente macroporos, proporción de arenas medias, gruesas y muy gruesas y Ks para la capa subsuperficial. A pesar de que en el análisis univariado la variable del rendimiento del cultivo no arrojó diferencias significativas, para el estudio multivariado esta variable sí permite diferenciar los lotes, encontrando que el LB es el que posee mayor rendimiento, además de mayor número de mazorcas por árbol y semillas por mazorca.

Por su parte, el suelo del LM está asociado a variables cuyos valores elevados puede acarrear limitaciones físicas para la productividad del cultivo, como los son: microporos, limo, af, amf, Da, MR y RMP, especialmente en la capa subsuperficial.

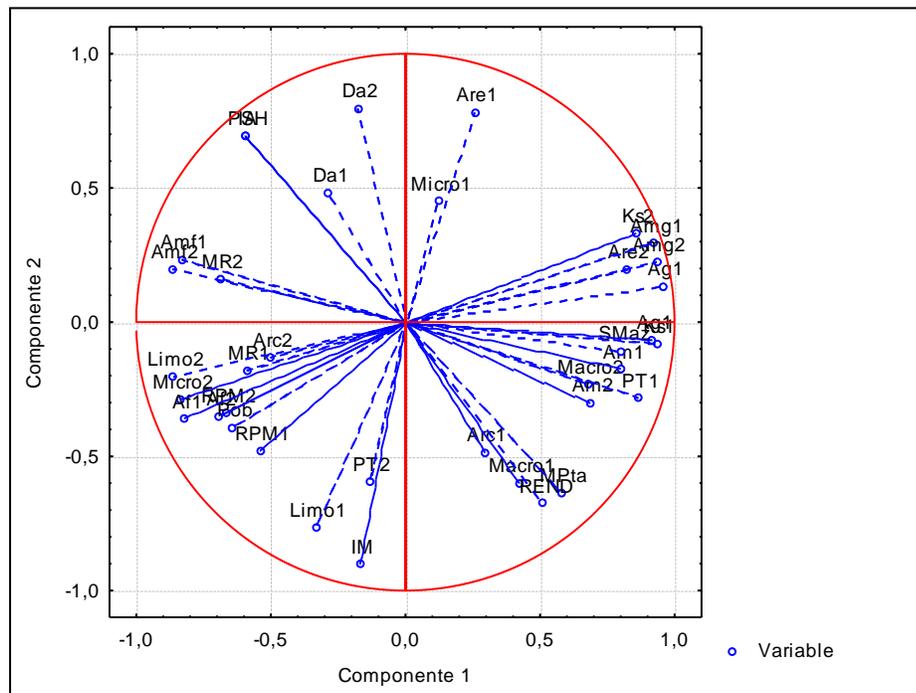


Figura 9. Proyección de los componentes principales 1 y 2 mostrando las variables físicas del suelo y de productividad del cultivo.

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 la variabilidad de los datos, obteniendo una función discriminante, lo que indica que efectivamente hay dos clases o grupos (Cuadro 6). Se puede apreciar que de acuerdo a esta función, las variables que tienen mayor poder discriminativo en orden de importancia son: contenido de arena gruesa en la capa superficial, rendimiento, contenido de limo, contenido de arena media y microporos en la capa subsuperficial del suelo, indicando que solo con conocer estas variables, sería suficiente para ubicar el lote en una clase de productividad.

Una vez que se definieron las funciones discriminantes, el análisis se validó realizando la clasificación de los mismos individuos que se usaron para generarla. Esta clasificación se realizó de dos maneras, una con los datos originales y una validación cruzada, en esta última se va extrayendo individuo por individuo y en cada caso, se generan las funciones discriminantes para luego clasificar el individuo extraído.

Cuadro 6. Variables indicadoras y coeficientes de la función discriminante

<i>Variable</i>	<i>Función</i>
	1
Micro2	-2.694
Limo2	10.189
am2	-4.646
ag1	26.394
Rend	25.128

Micro: Microporos, Am: Arena media, Ag: Arena gruesa, Rend: Rendimiento.
(1: Profundidad 0-15 cm, 2: profundidad 15-40 cm)

En el cuadro 7, se presenta los resultados de la validación normal y cruzada para corroborar la pertenencia de los individuos suelo a los grupos designados ‘*a priori*’, encontrando 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 LB y LM.

De acuerdo a las variables del suelo que este análisis consideró más importantes al momento de la separación de los lotes (microporos, limo, arena media y arena gruesa), se puede apreciar que la mayoría de ellas están relacionadas con la textura, como se ha señalado anteriormente, 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 en ambos lotes la producción se verá limitada, debido a la distribución granulométrica presente en ambos lotes.

Por otro lado al tomar en cuenta la proporción de microporos, el cual se relaciona directamente con PT, Da, RMP, MR y Ks, se pueden encontrar limitaciones físicas de igual forma en ambos lotes, pero aún más acentuado en el LM, 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.

Cuadro 7. Tabla de validación de acuerdo a las funciones discriminantes generadas con un nivel de confianza entre 5 y 10%.

Tipo de validación	Lote	Predicción de los miembros del grupo		Total
		LB	LM	
Conteo original	LB	4	0	4
	LM	0	4	4
	LB (%)	100	0	100
	LM (%)	0	100	100
Conteo validación cruzada	LB	4	0	4
	LM	0	4	4
	LB (%)	100	0	100
	LM (%)	0	100	100

Prácticas de manejo para mejorar la productividad del cultivo de cacao en función de sus limitaciones físicas

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que una de las principales limitaciones que presentan los suelos de los lotes evaluados, tiene que ver con la textura de los mismos, el predominio de texturas gruesas en ambos lotes los hacen marginales para el cultivo de cacao (Hardy, 1961; Sys *et al.*, 1993). Debido a que la textura de los suelos es una cualidad que no puede ser modificada, no existe labor alguna que optimice las características naturales de los mismos (Sierra y Rojas, 2002).

Los altos valores de porosidad total y poros con radio equivalente mayor de 15 μm , además de la alta conductividad hidráulica, hacen que se infiera que gran parte del agua que penetra en el suelo se puede perder rápidamente por drenaje profundo. Generalmente, los suelos arenosos retienen poca cantidad de agua a altos potenciales y esta disminuye rápidamente con el potencial de agua (Bruand *et al.*, 2005). Obi y Ebo (1995) afirman que dos terceras partes del agua presente a saturación en un suelo arenoso es usualmente drenada a -30 kPa.

Debido a que las pocas limitaciones se hallan principalmente en la capa de 15-40 cm, se hace difícil el manejo, ya que se trata de una plantación que está establecida, y que por la conformación morfológica de sus raíces impiden lograr cambios en las condiciones del suelo

en profundidad; sin embargo, es posible hacer mejoras en algunas propiedades físicas de la capa superficial que garanticen una mejor absorción de agua y nutrientes.

De igual manera, debido a los bajos contenidos de arcilla y materia orgánica, se puede inferir una baja retención de nutrientes, por lo que las prácticas para el mejoramiento de los suelos de la Hacienda Cuyagua también deberían considerar esta condición. Por otro lado, por tratarse de suelos ubicados en ecosistemas de frágil equilibrio ecológico (Jiménez *et al.*, 2012), se requiere de un manejo cuidadoso y que las prácticas seleccionadas sean amigables con el ambiente.

Diferentes prácticas han sido probadas y recomendadas para mejorar la capacidad de almacenamiento de agua en suelos arenosos. Por ejemplo, se ha sugerido la aplicación de arcilla en suelos arenosos del noreste de Tailandia, como una práctica semi-permanente para aumentar la retención de agua y nutrientes (Noble *et al.*, 2004).

Otros materiales como acondicionadores de suelo (naturales o sintéticos) pueden ser usados, tales como: polisacáridos, humus, mulches, estiércoles, poliacrilamida, polivinil alcohol, emulsiones asfálticas, silicatos de magnesio o aluminio en solución (Henríquez, 2000). Lobo *et al.*, (1984) encontraron un mejoramiento del balance hídrico en suelos arenosos de la Mesa de Guanipa con el uso de emulsiones asfálticas.

No obstante, para las condiciones de los suelos estudiados, la opción más adecuada, por la facilidad de implementación, su bajo costo y su compatibilidad con la fragilidad del agroecosistema, es el uso de materiales orgánicos. La mayoría de los materiales orgánicos aplicados a los suelos han tenido como propósito el mejoramiento de las propiedades químicas; sin embargo, han manifestado un valor agregado en el mejoramiento de las propiedades físicas de los suelos. Rivero *et al.*, (1998) encontraron un incremento en la retención de agua a -33 kPa en un suelo franco incorporando residuos vegetales, especialmente cuando la mezcla era de gramíneas y leguminosas.

Sierra y Rojas (2002), indican que el mejoramiento de las características físicas de los suelos por efecto de la incorporación de materia orgánica, se debe al aumento de la actividad biológica (microflora y mesofauna). La presencia de carbono permite un incremento de la población activa de hongos, bacterias, actinomicetos y algas, las cuales aceleran el flujo del

ciclo orgánico en el suelo, esto permite incrementar la biodiversidad. Otros organismos intermedios como lombrices, favorecen la agregación de partículas, promoviendo una mejor estructura. Esto determina una adecuada aireación del suelo además evita la compactación, por lo tanto, promueve un bajo impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces.

Por las razones discutidas anteriormente, se recomienda la incorporación de materia orgánica con el propósito de incrementar la capacidad de retención de agua del suelo, aumentar la estabilidad de los agregados, estimular la actividad biológica, aumentar la capacidad del suelo para retener nutrientes y mejorar la disponibilidad de los mismos.

La incorporación de la materia orgánica podría ser mediante la técnica de compostaje, el cual según Restrepo *et al.* (2014), es el proceso biológico en el que algunos microorganismos actúan sobre los residuos orgánicos en condiciones controladas, descomponiéndolos en forma rápida para obtener un producto denominado compost. Es un proceso de descomposición predominantemente aeróbica. Por su parte la FAO (1991), indica que es un producto estable y saneado (libre de patógenos y semillas de plantas) resultado de la degradación de los materiales orgánicos, por una población mixta de microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, entre otros) en un ambiente cálido, húmedo y aireado. La producción de compost se facilita siempre que se elaboren con una variedad de desechos orgánicos, en lugar de con uno solo. Cada componente de la mezcla realiza su propia contribución a los ciclos biológicos y de nutrientes de la pila de compostaje.

En este sentido, Girón *et al.* (2001), evaluaron la degradación de restos de cosecha del cultivo de cacao en tiempo, calidad y cantidad, realizando un proceso de compostaje estructurando 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 cacaotero, encontrando que la combinación que mostró una mejor dinámica de compostaje fue la de cáscaras de cacao + hojas secas de cacao + estiércol, donde se presentó la etapa termofílica más prolongada (13 días), período cuando ocurrió la máxima degradación de materia orgánica, el pH se mantuvo estable durante todo el proceso de compostaje (7- 8,2) y la relación C/N fue mayor a 20. A los 65 días el material compostado presentó coloración oscura, estructura migajosa, temperatura estable y olor a tierra, lo que hace muy eficiente la

mezcla de éstos materiales, para la obtención de un buen compost, que permita mejorar la calidad física, química y biológica del suelo donde se aplique.

En vista de que en el sistema de producción de la Hacienda Cuyagua se genera un gran volumen de residuos, procedentes del bosque cacaotero y de los restos de cosecha, que generalmente quedan dispersos entre la plantación, se plantea el aprovechamiento de los recursos disponibles en este ecosistema, para tomarlos como materia prima en la elaboración del compost, con el fin de convertir éstos residuos orgánicos en un valioso recurso que permita mejorar las condiciones físicas de los lotes evaluados. Entre las materias primas que se pueden utilizar están: cáscara y hojas secas de cacao, hojas y pseudotallo de algunas musáceas usadas en la plantación y malezas. Otros recursos pueden ser obtenidos en las cercanías de la localidad de Cuyagua, como lo son la fibra de coco y el estiércol de bovinos.

CONCLUSIONES

- Se pudo evidenciar un predominio de texturas gruesas (Franco arenosa, areno francosa y arenosa) en ambos lotes, lo que representa una primera limitación para el cacao, ya que este tipo de texturas no son las recomendadas para que el cultivo obtenga un buen rendimiento, ya sea por su baja capacidad de retener nutrientes o por la poca retención de agua.
- Las variables responsables de proveer las condiciones necesarias para el desarrollo y crecimiento radical (densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración y módulo de ruptura), presentaron mayores valores en el lote malo, hallándose también diferencias en profundidad dentro del perfil; sin embargo, se encontraron por debajo de los valores limitantes para la producción de cultivos.
- El número de mazorcas por planta se encontró por debajo del valor considerado óptimo, por lo que se puede decir que en general existe baja capacidad de producción. Por su parte indicadores como peso fresco de semillas, índice de almendras e índice de mazorcas, no presentaron variaciones importantes entre los lotes, encontrándose valores superiores a los requerimientos mínimos agronómicos e industriales para el cultivo de cacao. Finalmente el rendimiento resultó ser mayor en el lote bueno respecto al lote malo, superando al promedio nacional ($335 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, para el año 2014) en 50,7 % aproximadamente.
- De acuerdo a los análisis estadísticos realizados a las variables físicas del suelo y los parámetros del cultivo, tales como análisis de correlación, componentes principales y análisis discriminante, hay una clara separación entre los lotes bueno y malo.
- Para superar las principales limitaciones físicas encontradas en los lotes evaluados y aumentar los rendimientos actuales, se hace necesaria la aplicación de prácticas de manejo del suelo que contribuya a mejorar en mayor o menor grado las condiciones físicas de los mismos, es por ello que se recomienda la aplicación en ambos lotes de materia orgánica a través de la elaboración de un compost, utilizando la materia prima procedente del bosque cacaotero y otros recursos locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Angulo, J., L. Graziani, L. Ortiz y 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.
- Ampuero E. y 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.
- Ayestas, E., L. Orozco, C. Astorga, R. Munguía y C. Vega. 2013. Caracterización de árboles promisorios de cacao en fincas orgánicas de Waslala, Nicaragua. *Agroforestías en las Américas*. 49: 18-25.
- Barrios R. y A. Florentino. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 9 (4): 912-924.
- Brady, N. y R. Weil. 1999. *The nature and properties of soils: twelfth edition*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 881 p.
- Braudeau, J. 1970. *El Cacao*. Barcelona, España. Ed. Blume. 297 p. (Colección Agricultura Tropical).
- Bravo, C. 1993. Efectos de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de los suelos y su influencia en el rendimiento del algodón en un Alfisol del estado Guárico. Trabajo de grado. Postgrado en Ciencia de Suelo. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 118p.
- Bruand, A.; C. Hartmann; G. Lesturgez. 2005. Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. En: *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture*. "A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics". 27th November – 2nd December 2005, Khon Kaen, Thailand. Proceedings, pp. 148-158
- Casanova, O. y D. Lobo. 2007. Relación entre la física y la fertilidad de los suelos. *Venezuelos* 15: 42-55.
- Casanova, E. 2005. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Segunda Edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 482 p.
- Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios (FEDEAGRO). 2014. Estadísticas Agropecuarias. Consultado 12 Junio 2014. Disponible en <http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp>

- Corporación de los Andes (CORPOANDES). 2014. Cacao Venezolano. Consultado 12 Junio 2014. Disponible en <http://www.corpoandes.gov.ve/?q=node/109>
- Demey, J., M. Adams y H. Freitas. 1994. Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de fincas agropecuarias. *Agronomía Tropical* (Venezuela). 44(3): 475-497.
- Di Rienzo, J., F. Casanoves, M. Balzarini, L. González, M. Tablada y C. Robledo. InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Emmen, D. 2004. La agricultura de precisión: una alternativa para optimizar los sistemas de producción. *Investigación y Pensamiento Crítico*, 2:68-74.
- Enríquez, C. G. 1987. Manual del cacao para agricultores. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 150 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 1996. ARC VIEW GIS. The Geographic Information System for Everyone. Version 3.2. by ESRI. Product ID: 825921104087.
- Espinosa, J., F. Mite, S. Cedeño, S. Barriga y J. Andina. 2004. Manejo por sitio específico del cacao basado en sistemas de información geográfica. *Informaciones Agronómicas*, 60: 10-14
- FAO. 1991. Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Roma. 312 pp.
- Florentino, A. 1989. Efectos de la compactación sobre las relaciones hídricas en suelos representativos de la Colonia Agrícola de Turén. Tesis Doctoral. Postgrado en Ciencia de Suelo. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 207 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. 10p.
- Gavande, S. 1973. Física de suelos: principios y aplicaciones. Editorial Limusa-Wiley. México. 352 p.
- Girón, C., J. Tortolero, D. Hermoso e I. González. 2001. Efecto de diferentes residuos vegetales en la compostación de cáscara de cacao. *Agronomía Tropical* 51(4): 549-562.
- Google Earth. 2015. Consultado 20 Enero 2015. Disponible en <http://earth.google.com/>
- Gómez, M. y A. Azócar. 2002. Áreas potenciales para el desarrollo del cultivo cacao en el estado Mérida. *Agronomía Tropical* 52(4): 403-425.
- Hardy, F. 1961. Manual de cacao. Edit. Antonio Lehmann. Turrialba, Costa Rica. 439 p.
- Henríquez, R. M. A., 2000. Uso de la poliácridamida (PAM) como acondicionador de suelo. Serie Docencia No.45. UCLA. Decanato de Agronomía. Departamento de Suelos. 19p.
- Jacob, A. y H. Von Uexkull. 1973. Fertilización, Nutrición y abonado de los cultivos tropicales y subtropicales. 4ta. ed. Traducido por L. López Martínez de Alva. México, D.F. Ediciones Euroamericano. 626 p.
- Jaramillo J. D. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias* Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1(1): 73-83.

- Jiménez, R., J. Nogales y 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, Abril: 38-40.
- Johnson, D. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. International Thompson Editores. México. 566p.
- Kruskal, W. y W. Wallis. (1952). Use of ranks on one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47: 583-621.
- Lobo, D., I. Pla y 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
- Lobo, D., Z. Lozano, A. Salas, J. Rey, J. Aciego y W. Hernández. 2008. Introducción a la Ciencia del Suelo. Principios y procedimientos para el estudio del suelo en el ámbito agrícola y ambiental. Departamento de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay. 120 p.
- Mahibbur, R. y M. Govindarajulu, Z. 1997. A modification of the test of Shapiro and Wilks for normality. *Journal of Applied Statistics*, 24(2): 219-235.
- Malavolta, E., G.C. Vitti y S.A. De Oliveira. (1989). Availacao do estado nutricional das plantas: principios e aplicaciones. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa do Fosfato. POTAFOS. 200 p.
- Malespín, M. 1982. El Cacao. Ministerio de Desarrollo Agropecuario y Reforma Agraria; IICA. 61 p.
- Mestas, R., M. Roque, E. Matsura, D. Bizary y A. Paz. 2010. Variabilidad espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y de la productividad del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris*L) irrigado bajo un sistema de siembra directa. *Revista de Ciencias Agrárias*, 33(1):307-313.
- Ministerio del Poder popular para la Agricultura y Tierras (MPPAT). Consultado 12 Junio 2014. Disponible en: <http://censo.mat.gob.ve/>.
- Morera, J. y A. Mora. 1991. Evaluación del Cacao híbrido bajo dos sistemas de sombra en Turrialba, Costa Rica. *Turrialba*, 41(4): 572-577.
- Nacci, S. e I. Pla. 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. Serie B, N° 17. Maracay (Venezuela). 40p.
- Nacci, S. e 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.
- Noble, A., G. Gillman, and S. Ruaysoongnern. 2000. A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics. *European Journal of Soil Science*, 51: 233-24
- Núñez, J. 2000. Fundamentos de Edafología. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 188 p.
- Oades, J. and A. Waters. 1991. Aggregate Hierarchy in Soils. *Aust. J. Soil Res.*, 29, 81 5-28
- 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
- Oliveira P., E. Afif y M. Mayor. 2006. Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Ediciones de la Universidad de Oviedo. España. 161 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2014. Propiedades físicas del suelo. Consultado 18 Septiembre 2014. Disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Paredes, M. 2013. Manual del cultivo del cacao. Ministerio de Agricultura. Programa para el desarrollo de la amazonia. Perú. 100 p.
- Pla, I. 1978. Dinámica de las propiedades físicas y su relación con problemas de manejo y conservación de suelos agrícolas de Venezuela. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 201 p.
- 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. 91p.+
- Pla, I. 1986. Análisis Multivariado: Método de Componentes Principales. Instituto Interamericano de estadística. Sec. General de la OEA Washington, D.C. 89 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. 1995. Labranza y propiedades físicas de los suelos. En: Memorias de la II reunión bienal de la red de labranza conservacionista.1993. Guanare, Acarigua- Venezuela. pp. 26-41.
- Poesen, J. 1986. Surface sealing on loose sediments: the role of texture, slope and position of stones in the top layer. In: Callebaut F., D. Gabriels, and M. De Boodt (eds). Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting. Proc. of Symposium, Gent, Belgium. pp: 354-362.
- Quintero R. y L. García. 2010. La producción de cacao en Venezuela: Hacia una nueva ruralidad. Mérida, Venezuela. *Actualidad Contable FACES* 13(20):114-123.
- Ramos, G., A. Gómez y A. y De Ascencao. 2004. Caracteres morfológicos determinantes en dos poblaciones de cacao criollo del occidente de Venezuela. *Agronomía Trop.* v.54 n.1
- Red Agroclimática INIA-Período 1970-2014.
- Rencher, A. 1998. Multivariate statistical inference and applications. John Wiley&Sons, INC; Publication. New York. 559 p.
- Rencher, A. 2002. Methods of multivariate analysis. Second Edition. John Wiley & Sons, INC; Publication. New York. 708p.
- Restrepo J., J. Gómez y R. Escobar. 2014. Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura. Centro Internacional de Agricultura Tropical- CIAT. Cali, Colombia.
- Reyes, H. y L. Capriles. 2000. El cacao en Venezuela, Moderna tecnología para su cultivo. Chocolates El Rey, C.A. Caracas, Venezuela. 272p.

- Reynolds, W., D. Elrick, E. Youngs, A. Amoozegar, H. Booltink y J. Bouma. 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. En: *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*, Dane, J.; G. Topp. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 797-878.
- Rivero C.; D. Lobo; A. López P. 1998. Efectos de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades físicas de un alfisol degradado. *Venezuelos* 6(1 y 2): 29 – 33.
- Rodríguez, M. F., J. C. Rey, M. Núñez, A. Cortez, R. Salazar y B. Romero. 2003. Conozca el sistema de información de las áreas agroecológicas de Venezuela. CENIAP HOY REVISTA DIGITAL. 3: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/mfrodriguez.htm.
- Sánchez, J. 2007. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas: Conceptos Básicos. Fertilización técnica s.a (FERTITEC). 19 p.
- Sánchez-Mora F., J. Zambrano, J. Vera, R. Ramos, F. Garcés y G. Váscenez. 2014. Productividad de clones de cacao tipo nacional en una zona del bosque húmedo tropical de la Provincia de los Ríos, Ecuador. *Rev. Ciencia y Tecnología*, 7(1):33-4.
- Sierra, C. y C. Rojas. 2002. La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación. Santiago, Chile. 26 p.
- Sys, V., J. Debaveye y F. Beernaert. 1993. Land Evaluation, part III. International Training Centre for Post -graduate Soil Scientists University of Ghent. Ghent, Belgium. pp 56-59.
- Taboada, M. y F. Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 79 p.
- Taylor, J.C; G.A. Wood, R. Earl y R.J Godwin. 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability: Part II: spatial analysis and determination of management zones. *Biosystems Engineering*, 84(4): 441-453.
- Tejedor, F. 1999. Análisis de varianza: Introducción conceptual y diseños básicos. Arco Libros. Madrid, España. 136 p.
- Tisdall, J. y J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33 (2): 141-163.
- Thompson, L. y F. Troeh. 2002. Los suelos y su fertilidad. Editorial Reverté. Barcelona, España. 657 p.
- Trujillo R. 2015. Fertilidad química de los suelos y su relación con la productividad de cacao (*Theobroma cacao* L.), en Cuyagua estado Aragua. Trabajo de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 70p.
- Tukey J. 1977. Exploratory data analysis. Reading, MA, Addison-Wesley Publishing Co. 668 p.
- United States Department of Agriculture (USDA). Soil Conservation Service. 1992. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Invest. Rpt. N° 42. Washington, DC.
- Urquhart, D. 1963. Cacao. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 322 p.
- Webster, R. y M. Oliver. 1990. Statistical methods indica sol and land resourse survey. Oxford, University Prensa. 370 p.

ANEXOS

Anexo 1. Planilla de descripción del suelo en el Punto 1: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Bueno Fecha: 19-02-2015
 Punto: 1

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A	0-15	Fa	BS,F,D	10YR 4/2		0	-Coordenadas 642.800 E- 1.159.198 N -Fluventic haplustepts Fg, m, isoh
C ₁	15-35	a	G	10YR 4/4		0	
C ₂	35-70	aF	G	10YR 4/3		0	

Fa: Franco arenosa; a: arenosa; aF: Areno francosa; Bs: Bloques subangulares; F: fina; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 2. Planilla de descripción del suelo en el Punto 2: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Bueno Fecha: 19-02-2015
 Punto: 2

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-12	F	BS,F,D	10YR 3/2		0	-Coordenadas 642.834 E- 1.159.154 N -Pedregosidad a partir de los 35 cm -Litihc ustifluents Fg, m, isoh
C ₁	12-35	F	M	10YR 3/4		0	
C ₂	> 35	a	G	10YR 4/4		0	

Fa: Franco arenosa; F: Francosa; a: arenosa; Bs: Bloques subangulares; F: fina; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 3. Planilla de descripción del suelo en el Punto 3: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Bueno Fecha: 19-02-2015
Punto: 3

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-15	F	BS,M,D	10YR 3/2		0	-Coordenadas 642.888 E- 1.159.201 N -Pedregosidad presente en la tercera capa -Litihc ustifluents Fg, m, isoh
C ₁	15-38	Fa	M	10YR 4/3		0	
C ₂	> 38	aF	G	10YR 4/4		0	

F: Francosa; Fa: Franco arenosa; aF: Areno francosa; Bs: Bloques subangulares; M: mediana; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 4. Planilla de descripción del suelo en el Punto 4: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Bueno Fecha: 19-02-2015
Punto: 4

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-18	F	BS,F,D	10YR 3/2		0	-Coordenadas 642.827 E- 1.159.231 N -Pedregosidad presente a partir de los 55 cm -Typic ustifluents Fg, m, isoh
C ₁	18-40	Fa	G	10YR 3/3		0	
C ₂	40-55	aF	G	10YR 4/3		0	

F: Francosa; Fa: Franco arenosa; a: Arenosa; Bs: Bloques subangulares; M: mediana; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 5. Planilla de descripción del suelo en el Punto 5: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Malo Fecha: 19-02-2015
Punto: 5

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-12	F	BS,F,D	2.5Y 3/2		0	-Coordenadas 642.717 E- 1.159.229 N -Fluventic haplustepts Fg, m, isoh
B ₁	12-40	Fa	BS,F,D	2.5 Y 3/4		0	
C ₁	40-65	Fa	G	2.5 Y 4/2		0	
C ₂	65-80	a	G	10YR 5/4		0	

F: Francosa; Fa: Franco arenosa; a: Arenosa; Bs: Bloques subangulares; M: mediana; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 6. Planilla de descripción del suelo en el Punto 6: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Malo Fecha: 19-02-2015
Punto: 6

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-10	F	BSFD	10YR 3/3		0	-Coordenadas 642.704 E- 1.159.164 N -Typic ustifluents Fg, m, isoh
C ₁	10-40	Fa	G	10YR 3/4		0	
C ₂	40-65	Fa	G	2.5 Y 4/2		0	
C ₃	65-90	aF	G	2.5 Y 4/4		0	

F: Francosa; Fa: Franco arenosa; a: Arenosa; Bs: Bloques subangulares; F: Fina; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 7. Planilla de descripción del suelo en el Punto 7: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Malo Fecha: 19-02-2015
Punto: 7

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-15	Fa	BS,F,D	10YR 3/3		0	-Coordenadas 642.702 E- 1.159.110 N -Fluentic haplustepts Fg, m, isoh
B ₁	15-35	Fa	G	2.5 Y 4/4		0	
C ₁	35-60	Fa	G	2.5 Y 5/4		0	
C ₂	60-80	a	G	2.5 Y 4/4		0	

Fa: Franco arenosa; Bs: Bloques subangulares; F: Fina; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 8. Planilla de descripción del suelo en el Punto 8: a) descripción del barreno, b) Foto del suelo colectado en el barreno.

a)

Localidad: Cuyagua Lote: Malo Fecha: 19-02-2015
Punto: 8

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura	Color	Moteado	Reacción HCL	Observaciones
A ₁	0-15	F	BS,F,D	10YR 3/2		0	-Coordenadas 642.653 E- 1.159.084 N -Pedregosidad a partir de 75 cm de prof. -Fluentic haplustepts Fg, m, isoh
B ₁	15-40	Fa	BS,F,D	10YR 3/3		0	
C ₁	40-60	Fa	G	2.5 Y 4/4		0	
C ₂	60-75	Fa	G	2.5 Y 4/4		0	

F: Francosa; Fa: Franco arenosa; Bs: Bloques subangulares; F: Fina; D: débil; G: Granular

b)



Anexo 9. Estadísticos comunes para las variables físicas del suelo en ambos lotes evaluados.

	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana	Q1	Q3	Asimetría	Kurtosis
Lote Bueno	PT	45,63	5,7	32,53	12,5	38,33	54,16	45,88	40	49,83	0,11	-1,4
	Macro	24,03	3,49	12,2	14,54	19,93	29,51	24,64	20,3	25,95	0,14	-1,23
	Micro	21,61	5,15	26,56	23,85	14,43	29,53	22,14	16,09	24,65	0,03	-1,03
	Da	1,26	0,15	0,02	11,82	1,03	1,45	1,28	1,11	1,36	-0,31	-1,32
	Ks	429,38	183,01	33494,04	42,62	160,61	672,68	511,63	199,17	527,74	-0,48	-1,21
	MR	14,04	9,43	88,89	67,15	5,57	34,7	10,64	7,86	16,43	1,77	3,38
	RMP	241,55	140,75	19809,86	58,27	95,88	487,98	211,39	105,28	272,98	0,86	-0,31
	A	3,66	0,87	0,75	23,72	2	4,83	3,83	2,83	3,88	-0,95	1,13
	Limo	12,58	5,34	28,54	42,47	4,15	20,31	11,83	8,67	15,38	0,04	-0,55
	a	83,77	5,78	33,4	6,9	75,85	93,85	83,84	77,11	86,34	0,29	0,16
	Amf	9,68	2,32	5,4	24,01	7,07	13,34	9,21	7,46	11,56	0,43	-1,43
	Af	21,2	2,99	8,96	14,12	15,12	24,68	21,6	19,45	23,17	-1,19	1,8
	Am	22,87	2	4,01	8,75	20,62	26,63	22,25	21,25	24,1	0,91	0,27
	Ag	15,85	2,29	5,24	14,45	13,07	20,7	15,7	14,29	16,01	1,39	2,93
Amg	14,18	8	63,93	56,39	4,89	31,19	12,08	8,93	14,25	1,5	2,88	
Lote Malo	PT	42,47	1,73	2,98	4,07	39,05	44,9	42,61	41,61	43,24	-0,88	1,84
	Macro	20,6	2,21	4,87	10,72	18,32	24,66	19,71	18,84	21,48	1	-0,01
	Micro	23,31	4,46	19,87	19,12	20,04	33,79	22,31	20,24	23,16	2,29	5,78
	Da	1,29	0,13	0,02	9,74	1,1	1,45	1,28	1,19	1,39	-0,12	-1,65
	Ks	82,03	61,07	3729,1	74,45	10,72	185,69	66,22	15,12	120,27	0,53	-0,63
	MR	26,09	16,84	283,58	64,55	12,04	64,55	25,86	13,28	26,45	2,01	4,8
	RMP	375,14	196,26	38516,15	52,31	166,7	705,92	386,98	169,77	473,51	0,43	-0,92
	A	3,79	1	1,01	26,53	2,47	5,48	3,48	2,98	4,01	0,68	-0,26
	Limo	15,12	3,56	12,66	23,54	10,86	21,01	14,73	11,69	14,99	0,73	-0,41
	a	81,1	3,61	13,01	4,45	74,98	84,84	82,32	76,89	83,74	-0,82	-0,74
	Amf	33,28	9,66	93,23	29,01	23,33	48,45	29,49	27,06	33,39	1,07	-0,44
	Af	29,57	5,36	28,77	18,14	23,04	39,06	27,97	25,21	30,41	0,87	-0,02
	Am	13,65	4,56	20,77	33,38	7,03	20,55	13,59	8,05	16,84	-0,15	-0,63
	Ag	3,87	2,04	4,18	52,83	1,61	6,82	2,94	2,3	5,98	0,53	-1,87
Amg	1,05	0,47	0,22	44,59	0,51	1,67	1,01	0,52	1,31	0,28	-1,49	

PT: Porosidad total, Macro: Macroporos, Micro: Microporos, Da: densidad aparente, Ks: Conductividad Hidráulica, MR: Modulo de ruptura, RMP: Resistencia mecánica a la penetración, A: Arcilla, a: Arena, amf: Arena muy fina, af: Arena fina, am: Arena media, ag: Arena gruesa, amg: Arena muy gruesa.

Anexo 10. Estadísticos comunes para las variables de productividad del cultivo en ambos lotes evaluados.

	Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máy	Mediana	Q1	Q3	Asimetría	Kurtosis
Lote Bueno	MPta	19,13	5,98	35,77	31,27	13,75	26	18,38	13,75	22,25	0,32	-4,07
	SMaz	35,03	4,67	21,77	13,32	28,87	39,87	35,7	28,87	36,93	-0,75	0,6
	Psh	3,26	0,6	0,36	18,4	2,47	3,87	3,35	2,47	3,53	-0,73	0,14
	IA	1,6	0,29	0,09	18,4	1,21	1,9	1,64	1,21	1,73	-0,73	0,14
	IM	18,54	3,95	15,57	21,28	14,49	23,93	17,87	14,49	18,25	0,97	1,87
	Pob	491,25	117,5	13806,25	23,92	350	600	507,5	350	575	-0,44	-3,11
	Rend	505,33	145,2	21082,07	28,73	332,18	672,49	508,32	332,18	559,82	-0,1	-0,8
Lote Malo	MPta	11,69	1,34	1,81	11,5	10,25	13,5	11,5	10,25	11,5	0,82	1,87
	SMaz	27,55	3,71	13,76	13,46	22,33	30,6	28,63	22,33	29,73	-1,35	1,46
	Psh	4,15	0,81	0,66	19,56	3,32	5,23	4,03	3,32	4,27	0,77	0,38
	IA	2,04	0,4	0,16	19,56	1,63	2,56	1,98	1,63	2,09	0,77	0,38
	IM	19,06	1,92	3,7	10,09	16,76	20,91	19,29	16,76	20,36	-0,4	-2,99
	Pob	631,25	108,73	11822,92	17,23	475	725	662,5	475	675	-1,5	2,65
	Rend	329,06	110,35	12176,58	33,53	166,65	409,6	369,99	166,65	382,56	-1,78	3,28

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.