



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

RELACIÓN ENTRE SUELOS, NUTRIMENTOS Y CALIDAD DEL CACAO EN TABASCO

SANDRA PATRICIA FRANCISCO SANTIAGO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2021

La presente tesis, titulada “**Relación entre suelos, nutrimentos y calidad del cacao en Tabasco**”, realizado por la alumna: Sandra Patricia Francisco Santiago, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

CO-DIRECTOR:



DR. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. JOSÉ JESÚS OBRADOR OLÁN

ASESOR:



DR. PEDRO GARCÍA ALAMILLA

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2021

RELACIÓN ENTRE SUELOS, NUTRIMENTOS Y CALIDAD DEL CACAO EN TABASCO

Sandra Patricia Francisco Santiago, M.C.

Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, 2021

RESUMEN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) es de gran tradición en el estado de Tabasco, el cual está establecido bajo un sistema agroforestal con diversidad de árboles de sombra. Tabasco es el principal productor a nivel nacional y aún sigue ocupando un lugar importante en la economía del estado, esto a pesar de que en los últimos años se ha registrado una disminución en la superficie cultivada debido a problemas fitosanitarios. Las plantaciones de cacao establecidas se encuentran distribuidos en tres grupos de suelos representativos de la subregión Chontalpa, tales como Fluvisoles, Cambisoles y Vertisoles las cuales son considerados suelos fértiles debido a su origen aluvial. Se seleccionaron tres sitios de estudio, cada uno ubicado en los municipios de Cárdenas (Sitio 1), Comalcalco (Sitio 2) y Cunduacán (Sitio 3), previamente se realizó una verificación de campo para identificar a que pertenecían a diferentes grupos de suelo, posteriormente se realizaron las descripciones de perfiles de suelo clasificándose el Sitio 1 como Haplic Vertisol (Hypereutric, Gleyic), el Sitio 2 como Eutric Gleyic Cambisol (Clayic) y el Sitio 3 como Gleyic Eutric Fluvisol (Loamic). El Sitio 1 fue presento mayor fertilidad edáfica, seguidos del Sitio 2 y Sitio 3, el nivel de fertilidad se vio reflejada en el contenido nutrimental foliar. Los frutos de los tres sitios de estudios fueron cosechados en madurez fisiológica y los frutos y granos se caracterizaron morfológicamente, revelando que se encuentra el mismo material genético en todos los sitios de estudio. A los granos de cacao seco se les realizo diversos análisis fisicoquímicos, revelando que se encuentran dentro de los rangos adecuados para someterlas a proceso de fermentación.

Palabras clave: *cacao, fertilidad edáfica, concentración foliar, morfología de frutos, análisis fisicoquímico de granos.*

RELATIONSHIP BETWEEN SOILS, NUTRIENTS AND COCOA QUALITY IN TABASCO

Sandra Patricia Francisco Santiago, M.C.

Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, 2021

ABSTRACT

The cultivation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) is of great tradition in the state of Tabasco, which is established under an agroforestry system with a diversity of shade trees. Tabasco is the main producer nationwide and still occupies an important place in the state's economy, despite the fact that in recent years there has been a decrease in the cultivated area due to phytosanitary problems. The established cocoa plantations are distributed in three groups of representative soils of the Chontalpa subregion, such as Fluvisols, Cambisols and Vertisols, which are considered fertile soils due to their alluvial origin. Three study sites were selected, each one located in the municipalities of Cárdenas (Site 1), Comalcalco (Site 2) and Cunduacán (Site 3), previously a field verification was carried out to identify which they belonged to different soil groups. Subsequently, the descriptions of soil profiles were made, classifying Site 1 as Haplic Vertisol (Hypereutric, Gleyic), Site 2 as Eutric Gleyic Cambisol (Clayic) and Site 3 as Gleyic Eutric Fluvisol (Loamic). The Site 1 had the highest edaphic fertility, followed by Site 2 and Site 3, the level of fertility was reflected in the foliar nutrient content. The fruits of the three study sites were collected at physiological maturity and the fruits and grains were morphologically characterized, revealing that the genetic material is the same as that found in all the study sites. Various physicochemical analyzes were carried out on the dried cocoa beans, which revealed that they were within the appropriate ranges to subject them to the fermentation process.

Keywords: *Cocoa, soil fertility, foliar concentration, fruit morphology, physicochemical analysis of grains.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET) por otorgarme los financiamientos económicos de los programas: “Apoyo a la Realización de Estudios de Posgrados”, así como "Apoyos inherentes a la obtención del grado de maestría de estudiantes con trayectorias en la formación de vocaciones científicas”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento económico, para la realización de mis estudios de Postgrado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

A mi Director de tesis el Dr. David Jesús Palma López por ser un excelente mentor y por guiarme en la realización de este proyecto. Agradezco su asesoramiento, apoyo, paciencia y por su importante colaboración en el desarrollo de mi tesis.

A mi Co-Director de tesis el Dr. Rufo Sánchez Hernández por su apoyo, por su tiempo y dedicación a mi formación académica y por su importante colaboración en el desarrollo de mi tesis y por sus atinadas sugerencias.

Al Dr. José Jesús Obrador Olán por ser un extraordinario profesor, por su apoyo, su tiempo, su paciencia, pero sobre todo por brindarme su amistad y sus valiosos consejos.

Al Dr. Pedro García Alamilla por brindarme las herramientas necesarias, para concluir satisfactoriamente mí proyecto de postgrado.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPITULO I. FERTILIDAD EDÁFICA Y NUTRICIÓN EN EL CULTIVO DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.) EN TRES SUELOS DE TABASCO, MÉXICO.	3
1.1 RESUMEN.....	3
1.2 ABSTRACT.....	4
1.3 INTRODUCCIÒN	5
1.4 OBJETIVOS.....	6
1.5 HIPOTESIS.....	6
1.6 MATERIALES Y MÈTODOS	6
1.6.1 Ubicación del área de estudio	6
1.6.2 Establecimiento del experimento.....	7
1.6.3 Descripción taxonómica y caracterización de unidades pedológicas	8
1.6.4 Diagnostico nutrimental del suelo	8
1.6.5 Diagnostico nutrimental de tejidos foliares	9
1.6.6 Análisis estadístico.....	9
1.7 RESULTADOS Y DISCUSIÒN.....	9
1.7.1 Caracterización de la fertilidad edáfica de los suelos del SAF cacao.....	9
1.7.2 Diagnostico nutrimental de tejidos foliares	15
1.7.3 Correlaciones entre variables edáficas.....	16
1.8 CONCLUSIONES	18
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA EN TRES PLANTACIONES DE LA CHONTALPA, TABASCO, MÉXICO.....	19
2.1 RESUMEN	19
2.2 ABSTRACT.....	20

2.3 INTRODUCCIÓN	21
2.4 OBJETIVOS	22
2.5 HIPÓTESIS.....	22
2.6 MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.6.1 Ubicación del área de estudio	22
2.6.2 Caracterización morfológica de mazorcas	22
2.6.3. Contenido de sólidos solubles.....	24
2.6.4 Caracterización fisicoquímica.....	24
2.6.5 Análisis estadístico.....	25
2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
2.7.1 Caracterización morfológica de mazorcas de cacao	26
2.7.2 Caracterización fisicoquímica de semillas de cacao	31
2.8 CONCLUSIONES	34
CONCLUSIONES GENERALES.....	35
LITERATURA CITADA	35

LISTA DE CUADROS

CAPITULO I

Cuadro 1.1. Relación C/N de los tres sitios de estudio a tres profundidades en la Chontalpa, Tabasco, México.	11
Cuadro 1.2 Propiedades químicas de los tres sitios de estudio a tres profundidades en la Chontalpa, Tabasco, México.	13
Cuadro 1.3. Concentración de nutrientes en tejidos foliares de cacao en tres grupos de suelo en la Chontalpa, Tabasco, México.....	15

CAPITULO II

Cuadro 2.1. Caracteres cualitativos morfológicos para frutos de cacao.	23
Cuadro 2.2 Frecuencia de variables morfológicas de cacao del Poblado C-16 Cárdenas, Tabasco.	26
Cuadro 2.3. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en el Poblado C-16, Cárdenas, Tabasco.	27
Cuadro 2.4 Frecuencia de variables morfológicas de cacao de la R/a Sargento López, Comalcalco, Tabasco.	28
Cuadro 2.5. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en la R/a Sargento López, Comalcalco, Tabasco.	28
Cuadro 2.6 Frecuencia de variables morfológicas de cacao de Río Seco y Montaña, Cunduacán, Tabasco.	29
Cuadro 2.7. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en Río Seco y Montaña, Cunduacán, Tabasco.	30
Cuadro 2.8. Análisis químico proximal y fisicoquímicas de granos de cacao en tres sitios de la Chontalpa, Tabasco, México.....	33

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1. Localización de los sitios de estudio en la Chontalpa, Tabasco, México. 7

CAPITULO II

Figura 2.1. Agrupamiento de tres plantaciones de cacao sobre los primeros dos componentes principales (PC1 y PC2)..... 31

Figura 2.2 Gráfico de correlación de variables fisicoquímicas de granos de cacao. 32

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie perenne que pertenece a la familia Sterculiaceae, y es nativo de los bosques tropicales húmedos (Prabhakaran-Nair, 2010; Nigham & Singh, 2014). Los cacaotales son considerados agroecosistemas diversos que contribuyen a la conservación de una cubierta arbórea formada por árboles de cacao y de sombra, entre los que destacan el moté (*Erythrina americana* Mill.), el cedro (*Cedrela odorata* L.), el cocoíte (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp) y el tatúan (*Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg.), entre otros. Actualmente el cacao dejó de ser atractivo para los productores por la afectación por *Moniliophthora roreri* (enfermedad de la moliniasis), los consiguientes bajos rendimientos y los bajos precios (Alcudia-Aguilar *et al.* 2009; Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2016). Díaz-José *et al.* (2013) mencionan que durante el periodo 2000-2011 el cultivo de cacao en México registró una reducción de la producción de 43.7 %, particularmente debido a problemas fitosanitarios, que es actualmente la principal limitante de la producción de cacao en el estado de Tabasco (Torres De La Cruz *et al.*, 2013). Lo anterior ha provocado que los productores derriben sus plantaciones por el desconocimiento del manejo de la enfermedad, y se vislumbra que este problema podría incrementarse y ocasionar una disminución de las zonas cultivadas, lo que podría provocar además de una merma económica, un deterioro ambiental por la disminución en la captura de carbono que proporciona este agroecosistema (Barrón-García *et al.*, 2014). El cultivo de cacao juega un rol importante en la economía de México, pese a la problemática que enfrenta, ya que existe un mercado potencial, además de que el país cuenta con condiciones agroclimáticas adecuadas para incrementar la producción y lograr la autosuficiencia (Espinosa-García *et al.*, 2015). Por su parte, los factores edafoclimáticos, influyen en el desarrollo y crecimiento del cultivo de cacao (Almeida & Valle, 2007; Suárez *et al.*, 2013); requieren un rango de temperatura de entre 15° y 32°C (óptimo de 25°C), precipitación anual de entre 1500 y 3000 mm, suelos de origen aluvial, profundos, ricos en materia orgánica, texturas francas a arcillosas, pH de 6 a 7 (óptimo de 6.5) y bien drenados (Prabhakaran-Nair, 2010; López-Báez *et al.*, 2015, Arvelo *et al.*, 2017). La subregión Chontalpa posee las condiciones climáticas adecuadas para el ciclo fenológico del cacao, debido a que la temperatura promedio es de 26°C con una precipitación anual de 2500 mm (Pérez-Sosa & Granados-Ramírez, 2020) además de que, las plantaciones se encuentran establecidas principalmente en los grupos de suelos Fluvisoles, Cambisoles y Vertisoles, las cuales son de origen aluvial (López-Guemez, *et al.*, 2007; Palma-

López *et al.*, 2010) y poseen una buena fertilidad, debido a que son suelos profundos, con texturas que van desde medias a arcillosas y altos contenidos de materia orgánica (Palma-López *et al.*, 2017; Salvador-Morales *et al.*, 2019). Por su parte, desde el punto de vista comercial e industrial, los granos se dividen en dos categorías: los granos producidos del tipo forastero son conocidos como el “cacao ordinario” y son utilizados para la elaboración de chocolate comercial, y los granos del tipo criollo y trinitario, son conocidos como “cacao fino y de aroma”, con los que se elaboran chocolates de alta calidad (León-Villamar *et al.*, 2016). Castillo, Alvarez y Contreras (2018), mencionan que en la explotación cacaotera solo se aprovecha económicamente la semilla, que representa aproximadamente un 10 % del peso del fruto fresco.

CAPITULO I. FERTILIDAD EDÁFICA Y NUTRICIÓN EN EL CULTIVO DE CACAO **(*Theobroma cacao* L.) EN TRES SUELOS DE TABASCO, MÉXICO.**

1.1 RESUMEN

El cacao es un cultivo tradicional en el sur de México, que exhibe baja productividad debido a limitantes edáficas y de nutrición, por lo que el objetivo de la investigación fue diagnosticar la fertilidad edáfica y contenido nutrimental de las plantaciones de cacao, en los principales grupos de suelos cultivados en la Chontalpa, principal zona productora de Tabasco, para identificar las variables del suelo y nutrimentales que restringen la productividad del cultivo. Mediante análisis de imágenes satelitales, se seleccionaron sitios de muestreos en suelos representativos del área de estudio y se geoposicionaron las coordenadas para ubicarlos. Se describieron calicatas para clasificar los suelos de las parcelas, y se colectaron muestras de suelos a las profundidades de 0-10, 10-30 y 30-50 cm, para determinar variables indicadoras de la fertilidad del suelo. En arboles productores se colectaron muestras foliares para determinar las concentraciones de macronutrientes. Los resultados indican que las plantaciones se cultivan sobre Vertisoles, Cambisoles y Fluvisoles, que no presentan restricciones en la mayoría de las propiedades edáficas. Sin embargo, debido a la baja relación C/N (<12) de los suelos, hay una disminución en los contenidos de MO y N, que se suman a un déficit de K, que provocan bajas concentraciones de ambos macronutrientes en el follaje de las plantas. Se concluye que las principales restricciones edáficas que afectan al cultivo del cacao en la Chontalpa es la rápida pérdida de MO y déficit de N y K en el suelo, que provocan bajas concentraciones de ambos nutrientes en el follaje de los árboles.

Palabras clave: *Agroforestal, fertilidad edáfica, nutrición foliar, región Chontalpa.*

1.2 ABSTRACT

The cocoa is a traditional crop in southern Mexico, which has low productivity due to edaphic and nutritional limitations, so the objective of the research was to diagnose edaphic fertility and the nutritional content of cacao plantations, in the main groups of cultivated soils in the Chontalpa, the main producer area of Tabasco state, to identify the edaphic and nutritional variables that restrict the productivity of the crop. Through analysis of satellite images, sampling sites were selected in representative soils of the study area and the coordinates were geopositioned to locate them. Pits were described to classify the soils of the plots, and soil samples were collected at depths of 0-10, 10-30 and 30-50 cm, to determine variables that indicate soil fertility. In producer trees, foliar samples were collected to determine the concentrations of macronutrients. The results indicate that the plantations are cultivated on Vertisols, Cambisols and Fluvisols, which do not present restrictions in most of the edaphic properties. However, due to the low C / N ratio (<12) of the soils, there is a decrease in the OM and N contents, which are added to a K deficit, which cause low concentrations of both macronutrients in the foliage of the plants. It is concluded that the main edaphic restrictions that affect cocoa cultivation in Chontalpa is the rapid loss of OM and deficit of N and K in the soil, which cause low concentrations of both nutrients in the foliage of the trees.

Keywords: *Agroforestry, soil fertility, foliar nutrition, región Chontalpa*

1.3 INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los cultivos comerciales de exportación más importantes en las regiones tropicales (Bai *et al.*, 2017), donde México ocupa el decimotercer lugar de producción de cacao a nivel mundial (FAOSTAT, 2021). Por su parte, los cacaotales son considerados sistemas agroforestales (SAF-cacao) que contribuyen a la conservación de una cubierta arbórea formada por árboles de cacao y de sombra (Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2016; Salvador-Morales *et al.*, 2019) y es considerado uno de los recursos agrícolas y culturales más importantes del trópico húmedo mexicano (Díaz-José *et al.*, 2013). El estado de Tabasco es el principal productor de cacao a nivel nacional, la cual se produce bajo un sistema de cultivo tradicional conservacionista, generando el 73% de la producción nacional de cacao (De la Cruz-Landero *et al.*, 2015), es considerado el segundo cultivo más importante del estado, con 40,923 ha, distribuidos principalmente en la subregión de la Chontalpa, en los municipios de Cárdenas, Comalcalco y Cunduacán (SIAP, 2021). A esta actividad productiva se dedican en su mayor parte pequeños productores quienes dependen de ella para su sustento económico (Ramírez *et al.*, 2008). Por su parte, los factores edafoclimáticos, influyen en el desarrollo y crecimiento del cultivo de cacao (Almeida & Valle, 2007; Suárez *et al.*, 2013); requieren un rango de temperatura de entre 15° y 32°C (óptimo de 25°C), precipitación anual de entre 1500 y 3000 mm, suelos de origen aluvial, profundos, ricos en materia orgánica, texturas francas a arcillosas, pH de 6 a 7 (óptimo de 6.5) y bien drenados (Prabhakaran-Nair, 2010; López-Báez *et al.*, 2015, Arvelo *et al.*, 2017). La subregión Chontalpa posee las condiciones climáticas adecuadas para el ciclo fenológico del cacao, debido a que la temperatura promedio es de 26°C con una precipitación anual de 2500 mm (Pérez-Sosa y Granados-Ramírez, 2020), además de que, las plantaciones se encuentran establecidas principalmente en los grupos de suelos Fluvisoles, Cambisoles y Vertisoles, las cuales son de origen aluvial (López-Guemez, *et al.*, 2007; Palma-López *et al.*, 2010) y poseen una buena fertilidad, debido a que son suelos profundos, con texturas que van desde medias a arcillosas y altos contenidos de materia orgánica (Palma-López *et al.*, 2017; Salvador-Morales *et al.*, 2019). Por su parte, para determinar la fertilidad del suelo, se emplean diversos análisis químicos que permite cuantificar las variables que fijan los niveles de dicha fertilidad edáfica, lo que permite advertir los efectos que tienen sobre el abastecimiento de los elementos esenciales del cultivo, para corregir deficiencias e implementar estrategias para incrementar la productividad en los cultivos

(Etchevers, 1999; Schroeder *et al.*, 2005; Garbanzo-León *et al.*, 2017; Marrocos *et al.*, 2020). Existen numerosos estudios a nivel internacional sobre la fertilidad edáfica de las plantaciones de cacao (Cornwell, 2014; Salvador-Morales *et al.*, 2017; Wartenberg *et al.*, 2017; Aleixo *et al.*, 2019; Akinde *et al.*, 2020; Rangel-Mendoza y Silva-Parra, 2020;) de concentraciones foliares (Puentes-Páramo, Menjivar-Flores y Aranzazu-Hernández 2016; Marrocos *et al.*, 2020a; Marrocos *et al.*, 2020b) y de investigaciones que relacionan ambos aspectos (Cruz-Neto *et al.*, 2015; Araujo *et al.*, 2020; Dogbatse *et al.*, 2020; Rosas-Patiño, Puentes-Páramo y Menjivar-Flores, 2021). Debido a que Tabasco es el principal productor a nivel nacional, es de suma importancia que se genere conocimiento sobre la fertilidad y contenido nutrimental de las plantaciones de cacao establecidas, ya que por lo regular se interpreta y compara con resultados de otras investigaciones en condiciones edafoclimáticos diferentes. Es por ello que el objetivo del siguiente trabajo fue determinar la fertilidad edáfica y contenido nutrimental de las plantaciones de cacao en los tres principales grupos de suelos ubicados en la Chontalpa, Tabasco.

1.4 OBJETIVOS

1. Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los tres principales grupos de suelos en que se cultiva el cacao: Fluvisoles, Cambisoles y Vertisoles.
2. Evaluar el estado nutrimental de los árboles de cacao cultivados en los grupos de suelos.

1.5 HIPOTESIS

1. Las propiedades físicas y químicas son diferentes en cada uno de los grupos de suelos.
2. El estado nutrimental de los árboles varía de acuerdo a la fertilidad natural de los diferentes grupos de suelo.

1.6 MATERIALES Y MÉTODOS

1.6.1 Ubicación del área de estudio

En etapa de gabinete, se empleó la cartografía de suelos de Tabasco (Palma-López *et al.*, 2010; Palma-López *et al.*, 2017) para identificar los diferentes grupos de suelos ubicados en la subregión Chontalpa. Posterior a ello, se realizaron recorridos de campo en diferentes plantaciones de cacao,

con el fin de seleccionar un sitio de estudio por grupo de suelo, por lo que con ayuda de una barrena holandesa se realizaron barrenaciones de suelos hasta 1.50 m de profundidad para confirmar que pertenecían a unidades pedológicas diferentes. Se seleccionaron tres sitios de estudio, cada uno pertenecientes a los municipios de Cárdenas (Sitio 1), Comalcalco (Sitio 2) y Cunduacán (Sitio3); Figura 1.1; Anexos). Las plantaciones fueron seleccionadas por pertenecer a un grupo de suelo diferente, misma variedad cultivada (Guayaquil), de edad similar (30 años), con una superficie mínima de dos hectáreas y manejo agronómico similar (sin fertilización y sin riego).

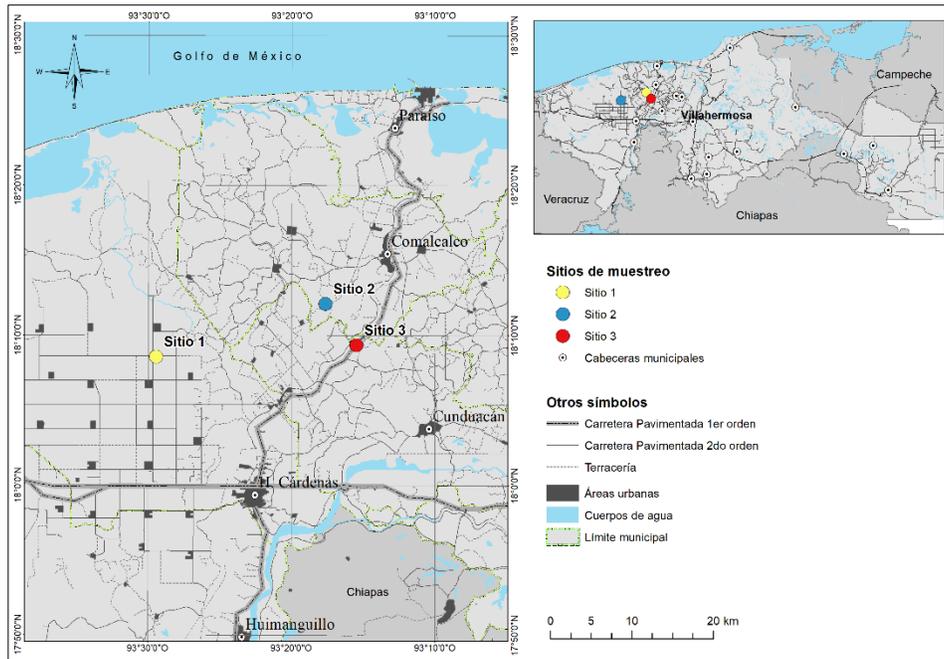


Figura 1.1. Localización de los sitios de estudio en la Chontalpa, Tabasco, México.

1.6.2 Establecimiento del experimento

En cada sitio de estudio, se delimitó una hectárea, se subdividió en cuatro cuadrantes (superficie por cuadrante: 2500 m²) y se seleccionaron de manera aleatoria las unidades experimentales (5 árboles de cacao por cuadrante).

1.6.3 Descripción taxonómica y caracterización de unidades pedológicas

En cada sitio de estudio, se realizó una calicata de 1.50 m de profundidad y se describió de acuerdo al Manual para la Descripción de Perfiles de Suelo en el Campo (Cuanalo, 1981). Posterior a su descripción en campo, en cada horizonte del perfil, se obtuvieron muestras de suelo, las cuales se secaron a la sombra, se molieron con un mazo de madera y se tamizaron con un tamiz #10 malla de 2 mm. Los análisis físicos y químicos de suelos realizados en cada horizonte fueron textura (método de Hidrómetro de Bouyoucos); densidad aparente (método del cilindro); potencial de Hidrógeno (pH; potenciómetro, medido en relación suelo-agua 1:2); conductividad eléctrica (CE; conductímetro, medido en relación suelo-agua 1:5); materia orgánica (MO; por el método de combustión húmeda de Walkley y Black); nitrógeno total (N; por digestión en Microkjeldahl); fósforo asimilable (P; por el método Olsen); capacidad de intercambio catiónico (CIC; por extracción en acetato de amonio pH 7) y bases intercambiables Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} (por extracción en acetato de amonio pH7 y lectura por absorción atómica) en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus Tabasco, de acuerdo a lo estipulado en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). A partir de la descripción de perfiles y de los resultados de los análisis físicos y químicos, se clasificaron taxonómicamente de acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2015).

1.6.4 Diagnostico nutrimental del suelo

Para conocer la fertilidad de los suelos de cada sitio de estudio, en cada unidad experimental (de cada uno de los cuadrantes), con ayuda de una barrena holandesa se realizaron muestreos en los cuatro puntos cardinales de la base de los árboles. Se tomaron submuestras de suelos a tres profundidades (0-10 cm; 10-30 cm y 30-50 cm) y a partir de las submuestras se mezclaron para obtener muestras compuestas por profundidad, las cuales se secaron a la sombra, se molieron con un mazo de madera y se tamizaron con un tamiz #10 malla de 2 mm. Los análisis físicos y químicos de suelos realizados en cada estrato de profundidad fueron pH (potenciómetro, medido en relación suelo-agua 1:2); materia orgánica (MO; por el método de combustión húmeda de Walkley y Black); nitrógeno total (N; por digestión en Microkjeldahl); fósforo asimilable (P; por el método Olsen); capacidad de intercambio catiónico (CIC; por extracción en acetato de amonio pH 7) y bases intercambiables Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} (por extracción en acetato de amonio pH 7 y lectura

por absorción atómica) con base en lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

1.6.5 Diagnostico nutrimental de tejidos foliares

Para conocer el estado nutricional de cada unidad experimental, se muestrearon 15 hojas sin daños del estrato medio (cinco por cada punto cardinal). La hoja seleccionada fue la numero cuatro (recientemente madura) obtenida contando desde la punta del ápice hacia adentro (Obrador-Olán, García-López & Calderón-Bolaina, 2010). Las hojas fueron almacenadas en bolsas de papel estraza para su posterior traslado al Área de Proceso de Muestras del COLPOS Campus Tabasco, en donde las hojas se lavaron con agua destilada, secaron al aire y se ingresaron a una estufa de aire forzado a 60°C por 24 horas. Posteriormente, se molieron y tamizaron con un tamiz #20 malla de 1 mm. Los análisis realizados fueron N (método de Semimicro-Kjeldahl); P (colorimetría de luz visible con molibdato de amonio); potasio (K), calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na) por espectrofotometría de absorción atómica (Álvarez-Sánchez & Marín-Campos, 2011).

Tanto los análisis de suelos como foliares de esta parte de la metodología, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos y Plantas del Centro de Investigación de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

1.6.6 Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue un completamente al azar. Los datos fueron analizados con un ANOVA, y para las variables que mostraron diferencias significativas se les aplicó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$ con el software Statistica, 2003

1.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.7.1 Caracterización de la fertilidad edáfica de los suelos del SAF cacao

Los sitios de estudio se encuentran sobre una planicie fluviodeltaica inactiva, la cual está compuesta de aluviones estables, esto debido a los sedimentos aluviales que se acumularon por el río Mezcalapa (Zavala-Cruz *et al.*, 2016). De acuerdo a los estudios de clasificación de suelos (IUSS Working Group WRB, 2015) realizados en esta investigación, los suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco corresponden a un Haplic Vertisol (Hypereutric,

Gleyic) para el Sitio 1; Eutric Gleyic Cambisol (Clayic) para el Sitio 2; y para el Sitio 3 un Gleyic Eutric Fluvisol (Loamic). En términos generales, se puede decir que el Sitio 1 presentó un porcentaje de arcilla por encima del 40% en todos los horizontes, y por ende, textura arcillosa, la cual es la característica principal de estos suelos. Los Vertisoles poseen una alta fertilidad natural, sin embargo, tiene ciertas restricciones, debido a que están compuestos de arcillas de expansión-retracción, las cuales se contraen al secarse en temporada de secas, formando agrietamientos, y en temporada de lluvia se expanden con la humedad, presentando problemas de anegamiento (Sotelo *et al.*, 2008; López-Castañeda *et al.*, 2017). Con respecto al Sitio 2, el grupo de suelo presentó texturas franco arcillosas sobre franco limosas, y una buena estructura en todos los horizontes. Estos suelos son considerados en proceso de desarrollo, debido a la formación de un horizonte B cámbico (Bojórquez *et al.*, 2007). Por su parte, el grupo de suelo del Sitio 3 presentó estratificación en sus horizontes, es decir, una diferenciación de texturas debido a los materiales flúvicos depositados. Estos suelos poseen una alta permeabilidad, son profundos, ricos en nutrimentos y materia orgánica, poseen buen drenaje superficial, y son considerados como suelos aptos para el cultivo del cacao (Ramos-Reyes *et al.*, 2004; Palma-López *et al.*, 2017).

Por su parte, una de las variables edáficas que son de particular interés para definir la fertilidad del suelo es la MO, se considera como una de las principales, dado que favorece la fertilidad física (densidad aparente, tasa de infiltración), química (suministro de nutrientes) y biológica del suelo (actividad microbiana) (Martínez *et al.*, 2008; Cantú-Silva y Yáñez-Díaz, 2018). Como se puede observar en el Cuadro 1.1, en los suelos CM y FL, las mayores concentraciones de MO se encuentran en los primeros 10 cm de profundidad, a diferencia de los VR, los cuales presentan contenidos de MO similares dentro de una capa más profunda, que va desde la superficie hasta los 50 cm. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Brito-Vega *et al.* (2017), quienes señalan que los suelos cultivados con cacao, que son más arcillosos tienen mayor capacidad para proteger la MO. De acuerdo con Rasmussen *et al.* (2018), las arcillas exhiben una mayor área superficial específica y generalmente presentan una carga permanente, que le confieren la capacidad de estabilizar mayor cantidad de MO, ya sea de manera directa mediante la sorción de los compuestos orgánicos a la superficie de las arcillas, o indirectamente mediante la formación de estructuras más estables. Otros estudios han señalado que, los suelos de los sistemas agroforestales de cacao en la Chontalpa Tabasco, registran niveles de MO medios y altos de Nt, con valores de 2.12 y 0.18 %

respectivamente entre 0-30 cm de profundidad, sin embargo, después de 30 cm, los niveles de ambas variables bajan a 0.80 y 0.09 % de MO y Nt respectivamente, que los ubican como niveles bajos en ambos casos (Pascual *et al.* 2017). Esos niveles de MO bajos, pueden ser producto de una rápida descomposición de los residuos orgánicos que se integran al suelo a través de la hojarasca. Los resultados que se indican en el Cuadro 1.1, reflejan una relación C/N menor a 12, en todos los suelos y profundidades, misma que se acentúa a mayor profundidad, estas relaciones C/N tan bajas predisponen una rápida mineralización, que por un lado liberan nutrientes disponibles para las plantas, pero, por otro lado, agotan las reservas orgánicas e influyen en la calidad de los productos húmicos finales (Gallardo, 2016). Debido a esta influencia que ejerce la relación C/N sobre la velocidad de descomposición de la MO, este parámetro se considera un indicador de la tasa de mineralización o inmovilización del N; valores altos de C/N indican que la MO se descompone lentamente, provocando inmovilización neta del N, en tanto que, una relación C/N <15, indica una óptima descomposición de la MO (Soto-Mora *et al.*, 2016; Gamarra-Lezcano *et al.*, 2018).

Cuadro 1.1. Relación C/N de los tres sitios de estudio a tres profundidades en la Chontalpa, Tabasco, México.

Suelos	Profundidad (cm)	Variables			Relación C/N
		MO (%)	CO (%)	Nt (%)	
VR	0-10	4.50±0.69a	2.61±0.40a	0.23±0.03a	11.26±0.98a
CM		4.57±0.79a	2.65±0.46a	0.23±0.03a	11.47±0.73a
FL		3.20±0.88b	1.86±0.51b	0.17±0.04b	10.65±0.76b
VR	10-30	2.81±0.58a	1.63±0.34a	0.16±0.03a	10.42±1.21a
CM		2.02±0.33b	1.17±0.19b	0.13±0.01b	9.21±0.90b
FL		1.66±0.67b	0.96±0.39b	0.11±0.03b	8.53±2.36b
VR	30-50	1.60±0.44a	0.93±0.25a	0.10±0.04a	9.53±1.42a
CM		1.18±0.20b	0.69±0.12b	0.08±0.01b	8.52±0.99b
FL		0.87±0.27c	0.51±0.15c	0.06±0.02c	8.24±1.57b

Uno de los productos de esa rápida mineralización a la que se alude en el párrafo anterior, es el nitrógeno, un elemento altamente demandado por las plantas de cacao (Furcal-Beriguete, 2017). Como se observa en el cuadro 1, las variables MO, Nt y la relación C/N guardan una estrecha relación, esto se debe a que el N junto con el C, son los principales constituyentes de la MO. Como se puede apreciar en el cuadro 1, el suelo VR presentó contenidos altos de N en sus tres profundidades, el CM alto para la primera y medios para las dos siguientes profundidades, mientras

que en el FL es medio para la primera, y bajos para la segunda y tercera profundidad respectivamente (DOF, 2002). La distribución del N en las diferentes capas del suelo revela que esas concentraciones de N provienen de la descomposición de la MO, por lo que al disminuir la reserva orgánica, el N disminuye notoriamente. Stevenson (1994) señala que, bajo condiciones templadas, solamente un tercio del C y N que entran al suelo a través de los residuos orgánicos, pueden permanecer como MO después de un año, a menos que haya factores edáficos extremos que restrinjan la actividad biológica. Si se toma en cuenta, que la precipitación y la temperatura son factores climáticos que aceleran la velocidad de la descomposición, es de esperarse que, en ambientes cálidos y húmedos como es el caso de la Chontalpa Tabasco, la cantidad de MO disminuya drásticamente (Gallardo, 2016), y con ello una liberación de N, que al paso del tiempo es lixiviado, debido a que el N orgánico se transforma en N amoniacal (NH_4^+) y nítrico (NO_3^-), que son las formas asimilables para las plantas, aunque muy móviles y fácilmente lixiviables (Celaya-Michel y Castellanos-Villegas, 2011). Justo debido a que el N es un nutriente que se pierde rápidamente, independientemente de que los suelos puedan recibir aportes importantes de MO, el uso combinado con fertilizantes beneficia la nutrición de las plantaciones de cacao, ya que los fertilizantes ponen a disposición de forma rápida N inorgánico al suelo, incrementando la velocidad de descomposición de los materiales orgánicos (Mulia *et al.*, 2017; Dogbatse *et al.*, 2021).

Otro indicador importante para definir los niveles de fertilidad edáfica es el pH. En el Cuadro 1.2 se puede observar que los pH son moderadamente ácidos en todos los suelos y profundidades (DOF, 2002). El pH de los suelos tropicales suele ser una de las restricciones más importantes para la producción de los cultivos (Ribeiro *et al.*, 2013), no obstante, valores por encima de 5.5 suelen ser óptimos para el buen crecimiento y desarrollo del cacao (Van Vliet *et al.* 2015). Solo el FL presentó diferencias estadísticas significativas entre profundidades, resaltando que la capa de 30-50 es ligeramente más ácida que las capas superficiales; sin embargo, en ningún caso, los valores de pH se pueden considerar como restrictivos para el cultivo de cacao.

En el caso del P, las deficiencias suelen ser comunes en los suelos agrícolas (Balemi y Negisho, 2012; Zhu *et al.*, 2018). Sin embargo, los niveles detectados en esta investigación se consideran altos (DOF, 2002), probablemente debido a la relación beneficiosa que existe entre el cacao y los

árboles de sombra, en donde el ciclo de nutrientes se ve mejorado por los aportes de la hojarasca (Issac *et al.*, 2007). Se observa que, en todos los sitios estudiados hubo una disminución del P conforme aumentó la profundidad (Cuadro 1.2). De manera general, la mayor concentración de P se ubica en la capa superficial de 0-10 cm, asociados probablemente a la liberación de iones PO_4^- producto de la mineralización de la MO, en particular, en los CM y FL que presentaron contenidos más altos. Cabe mencionar, que los valores de P obtenidos en esta investigación, son más altos que los encontrados en otros estudios realizados en plantaciones de cacao en la zona de estudio, que fueron de 8.15 mg kg^{-1} en la superficie, y de 5.35 mg kg^{-1} (López *et al.*, 2007; Pascual-Córdova *et al.*, 2017).

Cuadro 1.2 Propiedades químicas de los tres sitios de estudio a tres profundidades en la Chontalpa, Tabasco, México.

Suelos	Profundidad (cm)	Variables						
		pH	P	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	CIC
			(mg kg^{-1})	(Cmol(+)kg ⁻¹)				
VR	0-10	6.26±0.23a	23.97±7.36b	20.01±1.97a	9.00±1.46a	0.85±0.16a	0.32±0.18a	33.28±1.82a
CM		6.21±0.33a	46.02±32.89a	17.83±3.27b	5.23±0.64b	0.40±0.10b	0.24±0.11ab	26.81±3.20b
FL		6.24±0.44a	38.38±19.89ab	12.16±2.83c	3.68±0.57c	0.75±0.22a	0.20±0.12b	19.44±3.66c
VR	10-30	6.19±0.27a	18.58±7.37b	18.69±1.76a	9.16±1.24a	0.70±0.16a	0.32±0.17a	32.14±1.69a
CM		6.02±0.37a	42.85±36.18a	15.50±3.83b	4.41±0.62b	0.36±0.10b	0.25±0.10ab	23.96±3.80b
FL		5.87±0.51a	34.62±27.55ab	9.61±2.12c	3.46±0.65c	0.62±0.21a	0.18±0.09b	17.68±3.84c
VR	30-50	6.19±0.26a	15.64±6.53b	18.60±1.70a	9.61±1.33a	0.64±0.17a	0.36±0.19a	31.79±1.84a
CM		6.23±0.50a	38.53±31.86a	15.32±3.91b	4.56±0.59b	0.35±0.09c	0.29±0.11ab	23.01±3.48b
FL		5.69±0.27b	21.66±18.58ab	8.44±1.49c	3.91±0.93b	0.48±0.19b	0.18±0.11b	17.29±3.93c

Los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , presentaron diferencias significativas en todos los suelos (Cuadro 1.2). De manera general, el VR fue el que presentó mayor concentración de cationes intercambiables. Para el caso del Ca^{2+} , se observan diferencias significativas entre suelos y profundidades, el orden en que se presentaron las concentraciones de Ca^{2+} en los sitios estudiados fue, Vertisol>Cambisol>Fluvisol. De acuerdo a DOF (2002), en todas las profundidades se encontraron valores altos de Ca^{2+} con excepción de la profundidad de 30-50 cm del CM y FL que mostraron contenidos medios. El Ca^{2+} es un elemento que se encuentra comúnmente en concentraciones altas y medias en los suelos con plantaciones de cacao (Nelson *et al.*, 2012; Pascual-Córdova *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019), las razones pueden ser diversas, los suelos

estudiados son aluviales de origen, con contenidos importantes de Ca y las otras bases de intercambio (Palma *et al.*, 2017), además el Ca^{2+} es un nutriente que no se exporta en altas cantidades en el rendimiento de cacao (Turner, 1991), también el bombeo de nutrientes que hacen los árboles de sombra en el sistema agroforestal cacao, favorece el aporte de nutrientes en la superficie del suelo (Issac y Borden, 2019). El Mg^{2+} en todas las profundidades presentó altas concentraciones (DOF, 2002), la razón puede deberse a lo explicado para el Ca^{2+} . El aporte de Mg por la hojarasca de los árboles de sombra es de alrededor de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Báez, 2018), que es superior a las cantidades que exporta el rendimiento de una tonelada de cacao, que es de alrededor de $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Furcal-Beriguete, 2017). Conforme incrementó la profundidad de los suelos estudiados disminuyeron las concentraciones de Mg, casi en todos los casos hubo diferencias estadísticas significativas entre las profundidades de cada unidad de suelos, excepto para el FL en el que la profundidad dos y tres fueron estadísticamente iguales.

El nutriente K^+ en casi todas las unidades de suelo estudiadas presentó valores altos en la primera y tercera profundidad, teniendo valores medios en la segunda profundidad (DOF, 2002). La primera y tercera profundidades de las unidades de suelos VR y CM fueron estadísticamente similares (Cuadro 2) y con contenidos altos, el FL presentó valores altos en la primera profundidad y medios para la segunda y tercera (DOF, 2002). El K es el elemento nutriente que más demanda el cacao, oscila entre los 50 y $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cascarilla es la parte que más exporta a este elemento (Turner, 1991; Furcal-Beriguete, 2017), esto probablemente sea una de las razones por la que los suelos cacaoteros de Tabasco ha venido disminuyendo gradualmente sus contenidos, ya que ésta no se reincorpora al sistema por su potencial de causar enfermedades fungosas y por el desconocimiento de sus propiedades y características benéficas (Pascual *et al.*, 2017; Castillo *et al.*, 2018). Los cationes no se retienen con la misma intensidad en el complejo arcillo-húmico, por lo que, tanto la cantidad como el tipo de catión que puede retener el suelo depende de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, debido a la serie liotrópica, en la cual el Ca^{2+} es el catión que se encuentra en mayor proporción en el suelo, seguido del Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , esto debido a las valencias que posee cada elemento; este último es poco retenido, por lo que tiende a lixiviarse (Sadeghian y Zapata, 2015; Corona-Rodríguez, 2019; Cepeda, 2020). Todos los elementos nutrientes de los suelos estudiados presentaron contenidos suficientes para el óptimo rendimiento

de las plantaciones estudiadas (van Vliet *et al.*, 2017), sin embargo, por su importancia, es necesario dar seguimiento a la dinámica del K en los sistemas agroforestales del estado.

La CIC de los tres estratos de profundidad se diferencian estadísticamente entre los sitios de estudio, observándose una disminución de los valores conforme el aumento de la profundidad. Para el suelo VR, los niveles de CIC fueron altos ($>30 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) en todas las profundidades; para el CM, la primera profundidad se clasificó como alta y media para la segunda y tercera profundidad. En el FL las tres profundidades se clasificaron como medias (Cuadro 1.2; DOF, 2002). El sistema agroforestal cacao favorece la acumulación de residuos, los cuales, al mineralizarse gradualmente favorecen el incremento de la CIC, parámetro que se relaciona fuertemente con la retención de las bases de intercambio (Morales *et al.*, 2017; Jagoret *et al.*, 2019. De acuerdo con Sharma (2011), la rápida oxidación de la MO provoca la pérdida de los reservorios nutrimentales del suelo, por lo que la adopción o conservación de sistemas diversificados de uso de la tierra como agroforestería, agrihorticultura, agrosilvicultura como es el caso del cacao, permiten mantener una importante calidad del suelo.

1.7.2 Diagnostico nutrimental de tejidos foliares

Los resultados de los análisis foliares indican que todos los suelos evaluados, los arboles presentan limitaciones en cuanto a los contenidos de N y K (Cuadro 1.3), ya que de acuerdo con Jones *et al.* (1991) los niveles óptimos de estos nutrientes foliares, son superiores a 2.5 y 2.2 %, para N y K respectivamente.

Cuadro 1.3. Concentración de nutrientes en tejidos foliares de cacao en tres grupos de suelo en la Chontalpa, Tabasco, México.

Sitios	N	P	K	Ca	Mg	Na
	(%)					
1	1.90±0.26a	0.24±0.01b	2.64±0.16a	1.02±0.19b	0.73±0.11a	0.11±0.01c
2	1.72±0.13b	0.24±0.03b	1.20±0.19c	1.15±0.17a	0.67±0.06a	0.20±0.03ab
3	1.74±0.13b	0.33±0.05a	1.43±0.15b	1.01±0.17b	0.45±0.06b	0.18±0.03b

Sitios: 1 Vertisol, 2 Cambisol, 3 Fluvisol.

Las razones por las cuales se observan estos déficits, es que ambos elementos son los que más requieren los arboles de cacao para producir (Salgado *et al.* 2013), una situación que se combina con la susceptibilidad de que el N mineral, proveniente de la mineralización de la MO se lixivie, mientras que, en el caso del K, se trata del elemento que más se exporta a través de la cosecha, en

particular a través de las acumulaciones de nutrientes que ocurren en la cascara de la baya o mazorca. De acuerdo con Puentes-Páramo *et al.* (2014) la absorción de nutrientes en el cultivo de cacao es multifactorial, depende de las condiciones de suelo, de la genética de los árboles, de la luminosidad, así como de las condiciones del clima, por lo que es necesario realizar estudios enfocados a la fertilización y nutrición del cultivo, para obtener mayor rendimiento. En el caso de Tabasco, en la mayoría de los casos las plantaciones de cacao registran bajos rendimientos debido a que se trata de plantaciones longevas, bajos niveles de conocimiento técnico por parte de los productores, aunado a que la baja capacidad de reinversión en el sistema de producción, impide que los productores apliquen programas de fertilización y fitosanitarios orientados a mejorar los rendimientos de cosecha (Méndez-Sánchez *et al.* 2019).

1.7.3 Correlaciones entre variables edáficas

Se encontraron correlaciones altamente significativas ($P < .0001$) entre los contenidos de MO con el Nt en los tres estratos de profundidad ($R=0.94380$ (Prof.1); $R=0.91707$ (Prof.2); $R=0.89280$ (Prof.3)); lo anterior concuerda con datos reportados por Soto *et al.* (2016) quienes reportaron una positiva correlación. La disponibilidad del Nt depende de la MO, y es una variable de suma importancia para que exista actividad microbiana y haya mineralización del material orgánico del suelo, ya que a partir de esta se determina el N potencialmente disponible para la planta (Pramanik *et al.*, 2007; Illarze *et al.*, 2018).

Por su parte, los valores de pH reportados en la investigación indican que existe una buena disponibilidad de los nutrimentos en la solución del suelo, lo cual se ve reflejado en una alta correlación significativa ($P < .0001$) con el Ca en el suelo en la tercera profundidad ($R=0.77593$) estos datos son confirmados por Valbuena-Calderón, Martínez-Martínez y Giraldo-Henao (2008) y Moreno-Araujo (2009), quienes encontraron una estrecha relación entre ambas variables, obteniendo valores altos de Ca en el suelo con respecto al pH.

Así mismo, la CIC está influenciada por el contenido de MO que posee un suelo, por lo que puede retener y tener a disposición nutrientes procedentes de su mineralización (Torres-Benítez, Esquivel y Tinoco, 2017), la cual se confirma con la alta correlación positiva ($P < .0001$) entre ambas variables, teniendo que para la segunda profundidad se tiene una $R=0.75243$ y para la tercera profundidad una $R=0.78745$, esto se explica debido a que si existe un mayor contenido de MO esta

se verá reflejada en una mayor CIC, aparte de que la MO posee grupos carboxílicos con cargas eléctricas negativas y los cationes poseen cargas eléctricas positivas, y que por ende se atraen debido a sus diferentes cargas (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008; Obalum *et al.*, 2017; López-Báez *et al.*, 2019). El Ca es el catión que se encuentra en mayor cantidad en la solución del suelo, posee carga positiva, y por ende son adsorbidos en el complejo arcillo-húmico el cual está conformado por arcillas y humus (Sadeghian-Khalajabadi y Zapata-Hernández, 2015), es por ello que se encontró una alta correlación significativa ($P < .0001$) entre los contenidos de MO y el Ca en el suelo ($R = 0.76145$) en la tercera profundidad, cabe mencionar que los contenidos de Ca en esta investigación fueron altos.

Al respecto, en las tres profundidades, se encontraron correlaciones altamente significativas ($P < .0001$) de las bases intercambiables, en específico el Ca ($R = 0.91137$ (Prof.1); $R = 0.91569$ (Prof.2); $R = 0.89708$ (Prof.3) y el Mg ($R = 0.83581$ (Prof.1); $R = 0.85957$ (Prof.2); $R = 0.86014$ (Prof.3)) con respecto a la CIC de los suelos, lo anterior es porque la cantidad de bases en el suelo determina la fertilidad de la misma, lo que se ve reflejada en una buena CIC (Cruz-Macías *et al.*, 2020) como es el caso de los resultados obtenidos en esta investigación, ya que se obtuvieron buenos niveles en Ca y Mg (Cuadro 1.2). Se sabe que la planta refleja lo que el suelo le aporta (Pool-Novelo *et al.*, 2000), es por ello que de igual manera se vio reflejada en el contenido nutrimental de las hojas, teniendo una correlación altamente significativa ($P < .0001$) entre la CIC y el Mg foliar, teniendo en la primera profundidad una $R = 0.79126$, en la segunda profundidad una $R = 0.78381$ y en la tercera profundidad una $R = 0.76222$. Así mismo para la tercera profundidad una correlación altamente significativa ($P < .0001$) entre la CIC con K foliar ($R = 0.77188$). Estos resultados eran de esperarse, debido a que los contenidos de las bases de intercambio en el suelo se clasificaron como altos.

Los niveles de K no deben de ser bajos en el suelo, ya que provocaría un desequilibrio entre el Ca y Mg, causando deficiencias (Tisdale *et al.*, 1993; Salazar-García, 2002), es por ello que, los contenidos de Mg en el suelo reflejaron una alta correlación positiva con las concentraciones de K foliar (indicando que en el suelo existe una buena concentración de K (Cuadro 1.2), por lo que para las tres profundidades, los datos revelan que, a mayor contenido de Mg en el suelo se presenta una correlación altamente significativa ($P < .0001$) entre los contenidos de K foliar ($R = 0.82346$ (Prof.1); $R = 0.89140$ (Prof.2); $R = 0.88449$ (Prof.3)). Al respecto, el Ca en el suelo, presentó una

correlación altamente significativas ($P < .0001$) entre los contenidos de Mg foliar, teniendo para la primera profundidad una $R=0.77536$, para la segunda profundidad una $R=0.82032$ y para la tercera profundidad una $R=0.81975$. El Mg forma parte de molécula de clorofila, por lo que es esencial en la fotosíntesis para producir carbohidratos (Papenbrock *et al.*, 2001).

La correlación entre Na foliar y K foliar fue altamente significativa pero negativa, por lo que posiblemente exista un comportamiento antagónico entre estos dos elementos ($R=-0.78681$ (Prof.1), $R=-0.78681$ (Prof.2) y $R=-0.78681$ (Prof.3); $P < .0001$), lo anterior puede ser debido a que la toxicidad metabólica del Na compite con el K en los sitios de unión esenciales para la función celular, alterando la síntesis de proteínas, la cual está en función de la concentración de K (Tester y Davenport, 2003). Por lo regular esto se refleja en suelos salinos (Cakmak, 2005), en este caso, los suelos evaluados se clasificaron como efecto despreciable de salinidad (DOF, 2002), la cual significa que la salinidad es casi nula en los estratos evaluados, debido a que la CE es $<1.0 \text{ dS m}^{-1}$, por lo que es de interés que se investigue más a fondo la relación entre el Na:K a nivel fisiológico, para determinar qué es lo que causa el antagonismo.

1.8 CONCLUSIONES

El cultivo de cacao en la Chontalpa Tabasco, se establece sobre suelos VR, CM y FL, que generalmente no presentan restricciones edáficas para su desarrollo. Estos suelos presentan relaciones C/N <12 , hasta los 50 cm de profundidad, lo que conduce a una rápida pérdida de MO y N, que hacen de este elemento junto con el K, los dos macronutrientes más limitantes para el desarrollo de las plantaciones. Dichos resultados se reflejan en los contenidos foliares de las plantas, ya que son estos mismos nutrientes, los que se presentan en concentraciones deficitarias. Por lo anterior, esta investigación revela la necesidad de implementar programas de abonamiento orgánico, a partir de residuos de difícil degradación, con relaciones C/N entre 25-60, con la finalidad de restituir la MO que se mineraliza, así como suministrar fuentes fertilizantes orgánicas o minerales de N y K, para restaurar los déficits de estos elementos tanto en suelos como foliares.

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA EN TRES PLANTACIONES DE LA CHONTALPA, TABASCO, MÉXICO.

2.1 RESUMEN

En el presente estudio se evaluaron las características morfológicas y fisicoquímicas de mazorcas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres plantaciones ubicadas cada uno en los municipios de Cárdenas, Comalcalco y Cunduacán, Tabasco, México. Se evaluaron siete variables morfológicas cualitativas en los frutos, tales como forma de la mazorca, constricción basal, forma de ápice, superficie de la mazorca, profundidad de los surcos, color de la pulpa y color del fruto, así como seis variables morfológicas cuantitativas tanto en frutos como en granos, tales como diámetro, longitud y peso del fruto, grosor del exocarpio y número y peso de los granos. Se determinaron siete variables fisicoquímicas en los granos, que consideraron contenidos de sólidos solubles (grados Brix), humedad, pH de mucilago, pH de cotiledón, pH del grano, acidez total y materia grasa. Se realizó estadística descriptiva de los parámetros cuantitativos evaluados morfológicamente, así como los fisicoquímicos. Además se realizó un análisis de componentes principales (CP) para identificar rasgos distintivos y de agrupamiento entre similitudes así como la correlación de los parámetros evaluados fisicoquímicamente. Los datos revelan que morfológicamente existe el mismo material genético en los tres sitios de estudios evaluados; el análisis de CP reveló que los tres sitios de estudios se agrupan homogéneamente, y resultado de una correlación muy baja entre las variables fisicoquímicas evaluadas. Se encontraron valores promedios de entre 17.96° a 18.63° Brix; un pH de mucilago de 3.58-3.66; un pH de cotiledón de 6.31-6.34; pH del grano 4.99-5.17; acidez total de 0.84-0.95 meq NaOH/g; y un porcentaje de grasa de alrededor de 50.69 y 50.95%.

Esta información inicial da pauta para continuar con la investigación y conocer cómo cambian los valores en el proceso de fermentación y secado.

Palabras clave: cacao, fruto, granos, morfología, fisicoquímico

2.2 ABSTRACT

In the present study, the morphological and physicochemical characteristics of cocoa pods (*Theobroma cacao* L.) in three plantations located in the municipalities of Cárdenas, Comalcalco and Cunduacán, Tabasco, Mexico were evaluated. Seven qualitative morphological variables were evaluated in the fruits, such as ear shape, basal constriction, apex shape, ear surface, furrow depth, pulp color and fruit color, as well as six quantitative morphological variables both in fruits as in grains, such as diameter, length and weight of the fruits, thickness of the exocarp and number and weight of the grains. Seven physicochemical variables were determined in the grains, such as soluble solids content (Brix degrees), moisture, mucilage pH, cotyledon pH, grain pH, total acidity and fat. Descriptive statistics were performed on the quantitative parameters evaluated morphologically, as well as in the physicochemical parameters. In addition, a principal component (PC) analysis was performed to identify distinctive traits and grouping between similarities, as well as the correlation of the physicochemically parameters evaluated. The data reveal that morphologically that the material genetic is the same in the three evaluated study sites; The CP analysis revealed that the three study sites are grouped homogeneously, and resulted from a very low correlation between the evaluated physicochemical variables. Average values were found between 17.96 ° to 18.63 ° Brix; a mucilage pH of 3.58-3.66; a cotyledon pH of 6.31-6.34; grain pH 4.99-5.17; total acidity of 0.84-0.95 meq NaOH /g; and a fat percentage of around 50.69 and 50.95%. This initial information gives a guideline to continue with the investigation and to know how the values change in the fermentation and drying process.

Key word: *cocoa fruit, cocoa grains, cocoa morphology, cocoa physiochemical*

2.3 INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los cultivos perennes más importantes del mundo, y es utilizada casi exclusivamente para la fabricación de chocolate. Las diferentes variedades de cacao existentes en el mundo pertenecen a tres grupos: forasteros, criollos y trinitarios las cuales varían de acuerdo a su morfología, orígenes genéticos y geográficos (Almeida & Valle, 2007). Costa de Marfil es el principal productor a nivel internacional, dejando a México en el decimotercer lugar (FAOSTAT, 2021). Por su parte, Tabasco es el principal productor a nivel nacional (SIAP, 2021), genera el 73 % de la producción nacional de cacao (De la Cruz Landero *et al.*, 2015). Las plantaciones se distribuyen principalmente en la subregión de la Chontalpa, donde predominan grupos de suelos de origen aluvial, tales como Vertisoles, Cambisoles y Fluvisoles (Palma-López *et al.*, 2010; Salvador-Morales *et al.*, 2019). Desde el punto de vista comercial e industrial se dividen en dos categorías: los granos producidos del tipo forastero son conocidos como el “cacao ordinario” y son utilizados para la elaboración de chocolate comercial, y los granos del tipo criollo y trinitario, son conocidos como “cacao fino y de aroma”, con los que se elaboran chocolates de alta calidad (León-Villamar *et al.*, 2016). Castillo, Alvarez y Contreras (2018), mencionan que en la explotación cacaotera solo se aprovecha económicamente la semilla, que representa aproximadamente un 10 % del peso del fruto fresco. El sabor del grano de cacao es uno de los atributos de calidad más importantes, debido a que es fundamental para la aceptabilidad de los granos de cacao y los productos de cacao como el chocolate (Kongor *et al.*, 2016), el cual por lo regular se elabora con una mezcla de granos de cacao de diferentes orígenes, por lo que se ha tornado un especial interés sobre su trazabilidad, teniendo la certeza de que el producto final como tal cuanta con seguridad alimentaria (Vanderschueren *et al.*, 2019). Ramírez-Guillermo *et al.*, (2020) mencionan que es de suma importancia conocer la diversidad morfológica y genética presente en plantaciones establecidas, ya que es fundamental para el manejo y utilización de los recursos vegetales disponibles. Debido a que los granos de cacao se someten al proceso de fermentación, en la cual ocurren cambios internos importantes en el grano que desarrollaran los precursores aromáticos y de sabor, es indispensable que se conozcan valores iniciales de interés que permitan predecir cómo se comportará dicho proceso, tal es el caso de los contenidos de sólidos solubles que reflejan la cantidad de azúcares presentes en el mucilago (Álvarez, Pérez y Lares, 2002; Nielsen y Jespersen, 2013; Sarbu y Csutak, 2019). Así como se han realizado estudios

sobre los cambios que se producen antes y después del tostado con el fin de evaluar cómo se modifica el aroma en los granos de cacao (Marseglia *et al.*, 2020), es importante conocer los valores iniciales en granos frescos de los materiales locales y darle seguimiento en sus diferentes procesos.

2.4 OBJETIVOS

Caracterizar morfológicamente los frutos y granos de cacao, así como las propiedades fisicoquímicas de los granos.

2.5 HIPÓTESIS

Tanto los frutos como los granos de cacao poseen diferentes morfologías por grupo de suelo, así como las propiedades fisicoquímicas de las semillas.

2.6 MATERIALES Y MÉTODOS

2.6.1 Ubicación del área de estudio

En etapa de gabinete, se empleó el uso de la cartografía de suelos de Tabasco (Palma-López *et al.*, 2017) para identificar los diferentes grupos de suelos ubicados en la subregión Chontalpa. Posterior a ello, se realizaron recorridos de campo en diferentes plantaciones de cacao, con el fin de seleccionar un sitio de estudio por grupo de suelo, por lo que con ayuda de una barrena holandesa se realizaron barrenaciones de suelos hasta 1.50 m de profundidad para confirmar que pertenecían a unidades pedológicas diferentes. Se seleccionaron tres sitios de estudio, cada uno pertenecientes a los municipios de Cárdenas (Sitio 1), Comalcalco (Sitio 2) y Cunduacán (Sitio 3). Las plantaciones fueron seleccionadas por pertenecer a un grupo de suelo diferente, misma variedad cultivada (Guayaquil), de edad similar (30 años), con una superficie mínima de dos hectáreas y manejo agronómico similar (sin fertilización y sin riego). En cada sitio de estudio, se delimito una hectárea, se subdividido en cuadro cuadrantes (superficie del cuadrante: 2500m²) y se seleccionaron de manera aleatoria las unidades experimentales (5 árboles de cacao por cuadrante).

2.6.2 Caracterización morfológica de mazorcas

De cada unidad experimental se cosecharon todas las mazorcas sanas y en estado de madurez fisiológica. Las mazorcas y semillas fueron caracterizados morfológicamente de acuerdo a las

directrices descritas de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV Code: THEOB_CAC; UPOV, 2011). En la caracterización morfológica de la mazorca y semilla se consideraron siete variables cualitativas (Cuadro 2.1) y seis variables cuantitativas tales como diámetro de la mazorca (cm), longitud del fruto (cm), peso de la mazorca (g), número de semilla, peso de las semillas (g) y grosor del exocarpio (mm). Para el peso de las mazorcas y de las semillas se utilizó una balanza de precisión y para medir el diámetro y la longitud del fruto se midieron con un vernier de precisión micrométrica ± 0.01 mm.

Cuadro 2.1. Caracteres cualitativos morfológicos para frutos de cacao.

Carácter	Estado
1 Forma de mazorca	1 = oval 2 = circular 3 = elíptica 4 = oblonga 5 = oboval
2 Constricción basal	1 = ausente 3 = débil 5 = moderado 7 = fuerte
3 Forma del ápice	1 = entallado 2 = agudo 3 = obtuso 4 = redondeado
4 Superficie de la mazorca	1 = lisa o ligeramente rugosa 3 = moderadamente rugosa 5 = muy rugosa
5 Profundidad de los surcos	1 = ausente o muy poco profunda 2 = poco profunda 3 = media 4 = profunda
6 Color de la pulpa	1 = blanco 2 = crema claro 3 = crema oscuro
7 Color del fruto	1 = amarillo 2 = amarillo/verdoso 3 = amarillo/naranja 4 = naranja/purpura

Fuente: UPOV (2011).

Las semillas extraídas de cada unidad experimental de los tres sitios de estudio, fueron almacenadas en bolsas herméticas para su conservación en un congelador a -25°C , para su posterior análisis fisicoquímico.

2.6.3. Contenido de sólidos solubles

El contenido de sólidos solubles (grados Brix) del mucílago de los granos, se determinó con un refractómetro portátil Milwaukee modelo MA871.

2.6.4 Caracterización fisicoquímica

Por unidad experimental, se seleccionó una muestra de 60 g de semillas frescas y se les retiró la testa y el germen. Además, se seleccionaron 150 gramos de semillas frescas, se lavaron con agua destilada y secaron al sol sobre costales de henequen hasta que la humedad decreció al 6%. Estas semillas secas se les eliminó la cascarilla y el germen de forma natural para obtener los cotiledones. Tanto las semillas frescas como secas, se molieron y tamizaron a través de una malla #20. Ambas muestras se almacenaron en diferentes bolsas herméticas para su conservación y posterior análisis.

2.6.4.1 Análisis químico proximal

2.6.4.1.1 Humedad

Se seleccionaron aproximadamente 10 gramos de semillas secas y el contenido de humedad fue determinado por pérdida de peso en estufa a 103°C por 24 horas (AOAC, 1995).

2.6.4.1.2 pH de mucilago

De acuerdo a Pontillo (1998) se tomaron 10 granos frescos y se diluyeron en 100 ml de agua destilada en ebullición, se agitó durante 15 minutos en un rotavapor Thermo Scientific, posteriormente la mezcla se filtró y se realizó la medición de pH de mucilago con un potenciómetro Hanna Instrument pH211.

2.6.4.1.3 pH de cotiledón

Para la determinación de pH de cotiledón, se tomaron 10 gramos de semilla fresca y se diluyeron en 100 ml de agua destilada en ebullición, se agitó durante 15 minutos en un rotavapor Thermo Scientific, posteriormente la mezcla se filtró y se realizó la medición de pH de cotiledón con un potenciómetro Hanna Instrument pH211.

2.6.4.1.4 pH del grano

Se tomaron 10 granos frescos, los cuales se trituraron en una licuadora convencional con 100 ml de agua destilada en ebullición, se agitó durante 15 minutos en un rotavapor Thermo Scientific,

posteriormente la mezcla se filtró y se realizó la medición de pH de cotiledón con un potenciómetro Hanna Instrument pH211.

Todas las mediciones realizadas se expresaron directamente de la lectura del potenciómetro previamente calibrado con buffer de 4.0 y 7.0.

2.6.4.1.5 Determinación de acidez total expresada a través de la acidez libre

Se tomaron 10 gramos de muestra fresca y se adicionaron 100 ml de agua destilada, dejándose en agitación en un rotator Thermo Scientific durante una hora para su homogenización y se realizó una titulación potenciométrica con NaOH al 0.1 N a un valor de pH de 8.3. Los resultados se expresaron en ml de Hidróxido de Sodio gastados para neutralizar la acidez libre contenida en un gramo de cacao (ml de NaOH 0.1 N / g de cacao) (AOAC, 1995).

$$\text{Acidez libre} = (V \text{ NaOH } 0.1 \text{ N}) / 5$$

El coeficiente de Zeller permite el cálculo para acidez total:

$$\text{Acidez total} = \text{Acidez libre} (1/0.5792)$$

2.6.4.1.6 Materia grasa

La extracción de manteca de cacao se realizó mediante la técnica de Soxhlet, la cual consistió en utilizar como disolvente al éter de petróleo. Se utilizaron 5 gramos de muestra seca al sol y se dejaron reposar con el disolvente una noche y posteriormente se dejó en reflujo por 16 horas. La grasa se cuantificó por diferencia de peso inicial y final del matraz (AOAC, 1995).

2.6.5 Análisis estadístico

Se realizó estadística descriptiva de los parámetros cuantitativos evaluados morfológicamente. Además se realizó un análisis de componentes principales (PCA), así como la correlación de los parámetros evaluados fisicoquímicamente.

2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.7.1 Caracterización morfológica de mazorcas de cacao

La frecuencia de las variables morfológicas cualitativas de las mazorcas de cacao de cada sitio de estudio se muestran en los cuadros 2.2, 2.4 y 2.6, mientras que la descripción estadística descriptiva de las variables cuantitativas morfológicas en los cuadros 2.3, 2.5 y 2.7. En el Cuadro 2.2, para el Sitio 1 se observa que en los distintos cuadrantes evaluados para las variables morfológicas, la forma de mazorca dominante es la elíptica, sin embargo se encuentra un porcentaje menor de material con características de oval, oblonga y oboval. En cuanto a constricción basal se observa una heterogeneidad en los diferentes cuadrantes, donde el moderado y débil es el que se muestra con mayor frecuencia, encontrándose también en baja proporción ausente y fuerte. Se encontraron con frecuencia dos formas del ápice, siendo agudo el dominante, seguido del obtuso. La superficie de la mazorca se encuentra entre ligeramente y moderadamente rugosa. Para la profundidad de los surcos, se observa en mayor proporción características de muy poco profunda y profunda, con un porcentaje menor porcentaje de media. Tanto el color de la pulpa como el color fruto fueron similares en todo el sitio de estudio.

Cuadro 2.2 Frecuencia de variables morfológicas de cacao del Poblado C-16 Cárdenas, Tabasco.

Variables	Estado	Cuadrante1	Cuadrante2	Cuadrante3	Cuadrante4
		Porcentaje global (%)			
1) Forma de la mazorca	1 = oval	1.02	0	0	4.41
	2 = circular	0	0	0	0
	3 = elíptica	96.94	88.06	91.30	95.59
	4 = oblonga	1.02	11.94	8.70	0
	5= oboval	1.02	0	0	0
2) Constricción basal	1 = ausente	13.27	8.96	2.90	11.76
	2 = débil	55.10	38.81	34.78	22.06
	3 = moderado	31.63	41.79	42.03	42.65
	4 = fuerte	0	10.45	20.29	23.53
3) Forma del ápice	1 = entallado	0	0	0	0
	2 = agudo	59.18	44.78	79.71	60.29
	3 = obtuso	40.82	55.22	20.29	39.71
	4 = redondeado	0	0	0	0
4) Superficie de la mazorca	1 = lisa o ligeramente rugosa	66.33	61.19	46.38	52.94
	3 = moderadamente rugosa	23.47	38.81	53.62	47.06
	5= muy rugosa	0	0	0	0
5) Profundidad de los surcos	1 = ausente o muy poco profunda	63.27	41.79	42.03	33.82
	2 = poco profundo	32.65	47.76	57.97	52.94
	3 = media	4.08	10.45	0	13.24

	4 = profunda	0	0	0	0
6) Color de la pulpa	1 = blanco	100	100	100	100
	2 = crema claro	0	0	0	0
	3 = crema oscura	0	0	0	0
7) Color del fruto	1 = amarillo	0	0	0	0
	2 = amarillo/verdoso	100	100	100	100
	3 = amarillo/Naranja	0	0	0	0
	4 = naranja/purpura	0	0	0	0

En el Cuadro 2.3 se observa una homogeneidad de las variables cuantitativas en todos los cuadrantes evaluados. Se encontró que el diámetro del fruto oscilo entre los 82.83-86.71 mm, la longitud del fruto fue alrededor de 15 cm, el peso del fruto oscilo entre los 434.42-489.29 g y el grosor del exocarpio de los frutos estuvo alrededor de 14.10-16.05 mm; se encontraron alrededor de 42 semillas por fruto y el peso oscilo entre 109.96-115.47 g.

Cuadro 2.3. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en el Poblado C-16, Cárdenas, Tabasco.

	Media	DS	Min	Max	CV	Media	DS	Min	Max	CV
	Cuadrante 1					Cuadrante 2				
Diámetro del fruto (mm)	85.42	6.05	66.76	98.80	0.07	85.78	5.15	71.58	97.01	0.06
Longitud del fruto (cm)	15.81	1.88	12.20	21.00	0.12	15.54	1.58	12.80	20.60	0.10
Peso del fruto (g)	485.41	125.04	253.70	852.10	0.26	476.07	89.12	316.40	831.50	0.19
Número de semillas	42.06	4.65	28.00	50.00	0.11	41.81	4.85	25.00	51.00	0.12
Peso de las semillas (g)	115.31	27.11	65.40	202.10	0.24	115.47	20.70	78.20	190.20	0.18
Grosor del exocarpio (mm)	15.96	2.04	11.43	20.90	0.13	16.05	1.76	12.75	19.64	0.11
	Cuadrante 3					Cuadrante 4				
Diámetro del fruto (mm)	82.83	5.68	69.86	96.40	0.07	86.71	7.30	70.43	101.48	0.08
Longitud del fruto (cm)	15.41	1.16	12.10	18.40	0.08	15.79	1.78	12.40	19.70	0.11
Peso del fruto (g)	434.42	82.14	254.20	640.20	0.19	489.29	140.31	223.60	809.20	0.29
Número de semillas	43.91	3.04	35.00	49.00	0.07	41.53	4.74	26.00	49.00	0.11
Peso de las semillas (g)	109.96	15.51	69.70	147.60	0.14	112.71	22.71	61.10	164.10	0.20
Grosor del exocarpio (mm)	14.10	2.31	8.33	18.86	0.16	15.56	2.55	9.25	20.98	0.16

En el Cuadro 2.4, para el Sitio 2 se observa que en los distintos cuadrantes evaluados para las variables morfológicas, la forma de mazorca dominante es la elíptica y en menor porcentaje se encuentran materiales con forma oval y oblonga. En cuanto a constricción basal se observa que domina la constricción débil, siguiente de moderado y en bajo porcentaje la ausente. Se encontraron con frecuencia dos formas del ápice, siendo obtuso el dominante, seguido del agudo. La superficie de la mazorca se encuentra entre ligeramente y moderadamente rugosa. Para la profundidad de los surcos, se observa en mayor proporción características

de muy poco profunda y profundo, y en menor proporción media y profunda. Tanto el color de la pulpa como el color fruto fueron similares en todo el sitio de estudio.

Cuadro 2.4 Frecuencia de variables morfológicas de cacao de la R/a Sargento López, Comalcalco, Tabasco.

Variables	Estado	Cuadrante1	Cuadrante2	Cuadrante3	Cuadrante4
		Porcentaje global (%)			
1) Forma de la mazorca	1 = oval	0	0	0	1.32
	2 = circular	0	0	0	0
	3 = elíptica	95.00	100	96.67	97.37
	4 = oblonga	5.00	0	3.33	1.32
	5 = oboval	0	0	0	0
2) Constricción basal	1 = ausente	6.67	1.69	8.33	7.89
	2 = débil	6.63	69.49	65.00	69.74
	3 = moderado	28.33	28.81	26.67	22.37
	4 = fuerte	1.67	0	0	0
3) Forma del ápice	1 = entallado	0	0	0	0
	2 = agudo	35.00	49.15	20.00	25.00
	3 = obtuso	65.00	50.85	78.33	75.00
	4 = redondeado	0	0	1.67	0
4) Superficie de la mazorca	1 = lisa o ligeramente rugosa	51.67	52.54	48.33	57.89
	3 = moderadamente rugosa	48.33	47.46	51.67	42.11
	5 = muy rugosa	0	0	0	0
5) Profundidad de los surcos	1 = ausente o muy poco profunda	55.00	59.32	30.00	63.16
	2 = poco profundo	43.33	40.68	58.33	32.89
	3 = media	1.67	0	11.67	3.95
	4 = profunda	0	0	1.67	0
6) Color de la pulpa	1 = blanco	100	100	100	100
	2 = crema claro	0	0	0	0
	3 = crema oscura	0	0	0	0
7) Color del fruto	1 = amarillo	0	0	0	0
	2 = amarillo/verdoso	100	100	100	100
	3 = amarillo/naranja	0	0	0	0
	4 = naranja/purpura	0	0	0	0

En el Cuadro 2.5 se observa una homogeneidad de las variables cuantitativas en todos los cuadrantes evaluados. Se encontró que el diámetro del fruto oscilo entre los 84.11-87.26 mm, la longitud del fruto fue alrededor de 14.80-15.75 cm, el peso del fruto oscilo entre los 448.98-510.27 g y el grosor del exocarpio de los frutos estuvo alrededor de los 16 mm; se encontraron alrededor de 40-43 semillas por fruto y el peso oscilo entre 98.82-113.55 g.

Cuadro 2.5. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en la R/a Sargento López, Comalcalco, Tabasco.

	Media	DS	Min	Max	CV	Media	DS	Min	Max	CV
	Cuadrante 1					Cuadrante 2				
Diámetro del fruto (mm)	84.11	6.49	71.27	101.62	0.08	87.26	6.71	62.10	110.50	0.08
Longitud del fruto (cm)	14.98	1.46	11.40	18.20	0.10	15.75	1.44	12.70	18.90	0.09
Peso del fruto (g)	457.41	95.48	249.00	673.90	0.21	510.27	99.47	323.00	763.90	0.19
Número de semillas	42.90	4.46	32.00	52.00	0.10	43.36	3.54	34.00	50.00	0.08
Peso de las semillas (g)	105.42	16.39	62.00	137.30	0.16	113.55	20.22	59.00	175.20	0.18
Grosor del exocarpio (mm)	16.80	8.75	10.27	81.16	0.52	16.10	1.97	9.87	20.47	0.12

	Media	DS	Min	Max	CV	Media	DS	Min	Max	CV
	Cuadrante 3					Cuadrante 4				
Diámetro del fruto (mm)	86.65	6.57	73.05	100.15	0.08	85.15	5.66	67.60	99.86	0.07
Longitud del fruto (cm)	14.87	1.47	11.60	18.70	0.10	14.80	1.39	11.40	17.80	0.09
Peso del fruto (g)	462.73	110.17	241.60	732.30	0.24	448.98	96.10	192.50	673.60	0.21
Número de semillas	40.64	4.16	28.00	47.00	0.10	40.05	4.90	25.00	48.00	0.12
Peso de las semillas (g)	102.02	18.57	57.10	150.50	0.18	98.82	16.85	49.80	131.60	0.17
Grosor del exocarpio (mm)	16.42	2.64	10.70	21.98	0.16	16.20	2.26	10.60	21.77	0.14

En el Cuadro 2.6, para el Sitio 3 se observa que en los distintos cuadrantes evaluados para las variables morfológicas, la forma de mazorca dominante es la elíptica, con un porcentaje menor de material con características de oblonga y oboval. Se observa constricción basal débil, ausente, moderado y en un bajo porcentaje fuerte. Se encontraron con frecuencia dos formas del ápice, siendo agudo el dominante, seguido del obtuso. La superficie de la mazorca se encuentra entre ligeramente y moderadamente rugosa. Se observa heterogeneidad en la profundidad de los surcos del fruto encontrándose un porcentaje mayor de poco profundo, seguido de muy poco profunda y media. Tanto el color de la pulpa como el color fruto fueron similares en todo el sitio de estudio.

Cuadro 2.6 Frecuencia de variables morfológicas de cacao de Río Seco y Montaña, Cunduacán, Tabasco.

Variables	Estado	Cuadrante1	Cuadrante2	Cuadrante3	Cuadrante4
		Porcentaje global			
1) Forma de la mazorca	1 = oval	0	0	0	0
	2 = circular	0	0	0	0
	3 = elíptica	93.42	99.36	100	100
	4 = oblonga	5.26	0.64	0	0
	5 = oboval	1.32	0	0	0
2) Constricción basal	1 = ausente	34.21	14.65	45.45	37.59
	2 = débil	51.97	49.68	48.05	48.12
	3 = moderado	13.82	24.84	3.90	10.53
	4 = fuerte	0	10.83	2.60	3.76
3) Forma del ápice	1 = entallado	0	0	0	1.50
	2 = agudo	65.79	80.89	55.84	71.43
	3 = obtuso	34.21	19.11	44.16	27.07

	4 = redondeado	0	0	0	0
4) Superficie de la mazorca	1 = lisa o ligeramente rugosa	25.00	36.94	16.88	13.53
	3 = moderadamente rugosa	75.00	63.06	83.12	86.47
	5= muy rugosa	0	0	0	0
5) Profundidad de los surcos	1 = ausente o muy poco profunda	26.97	35.67	16.88	48.12
	2 = poco profundo	48.68	52.87	51.95	39.85
	3 = media	24.34	11.46	31.17	12.03
	4 = profunda	0	0	0	0
6) Color de la pulpa	1 = blanco	100	100	100	100
	2 = crema claro	0	0	0	0
	3 = crema oscura	0	0	0	0
7) Color del fruto	1 = amarillo	0	0	0	0
	2 = amarillo/verdoso	100	100	100	100
	3 = amarillo/naranja	0	0	0	0
	4 = naranja/purpura	0	0	0	0

En el Cuadro 2.7 se observa una homogeneidad de las variables cuantitativas en todos los cuadrantes evaluados. Se encontró que el diámetro del fruto oscilo entre los 83.7-87.02 mm, la longitud del fruto fue alrededor de 15 cm, el peso del fruto oscilo entre los 460.89-485.09 g y el grosor del exocarpio de los frutos estuvo alrededor de 14.53-16.66 mm; se encontraron alrededor de 37 semillas por fruto y el peso oscilo entre 88.63-93.76 g.

Cuadro 2.7. Parámetros estadísticos de seis variables cuantitativas morfológicas evaluadas en fruto y granos de cacao en Río Seco y Montaña, Cunduacán, Tabasco.

	Media	DS	Min	Max	CV	Media	DS	Min	Max	CV
	Cuadrante 1					Cuadrante 2				
Diámetro del fruto (mm)	85.06	6.68	66.77	102.73	0.08	84.58	7.86	68.05	104.55	0.09
Longitud del fruto (cm)	15.48	2.08	5.80	22.10	0.13	15.31	1.47	12.10	19.65	0.10
Peso del fruto (g)	475.07	139.19	274.30	926.40	0.29	460.89	119.89	255.40	786.20	0.26
Número de semillas	37.61	6.65	17.00	48.00	0.18	37.45	6.99	17.00	49.00	0.19
Peso de las semillas (g)	89.12	21.91	38.00	160.90	0.25	91.13	23.45	35.40	167.80	0.26
Grosor del exocarpio (mm)	15.49	2.30	9.63	21.13	0.15	15.50	3.20	7.14	23.45	0.21
	Cuadrante 3					Cuadrante 4				
Diámetro del fruto (mm)	87.02	7.70	69.73	104.46	0.09	83.70	8.69	67.32	113.11	0.10
Longitud del fruto (cm)	15.28	1.42	11.80	18.50	0.09	15.59	1.82	12.10	23.50	0.12
Peso del fruto (g)	475.07	111.45	250.70	715.20	0.23	485.09	139.68	286.80	981.10	0.29
Número de semillas	38.65	6.13	22.00	49.00	0.16	37.02	8.01	13.00	51.00	0.22
Peso de las semillas (g)	88.63	18.16	43.20	123.40	0.20	93.76	19.92	44.20	154.90	0.21
Grosor del exocarpio (mm)	16.66	2.40	11.40	21.94	0.14	14.53	3.99	7.36	26.64	0.27

Ramírez-Guillermo *et al.* (2018) reportaron variaciones morfológicas en frutos y semillas en plantaciones establecidas en Tabasco; sin embargo, para los tres sitios de estudio evaluados en esta investigación, los resultados revelan que las características morfológicas de los frutos y granos de las plantaciones de cacao son similares, por lo que posiblemente pertenezcan al mismo material genético, aunque sería de interés que se realizase un análisis molecular para conocer la variabilidad de materiales, así como su potencial agronómico (Martínez, 2016; Montaleza-Armijos, Quevedo-Guerrero & García-Batista, 2020).

2.7.2 Caracterización fisicoquímica de semillas de cacao

El ACP encontró que el CP1 describe el 32.3% de la variación total, la cual es descrita por los grupos de suelo Vertisol, Cambisol y Fluvisol, y el CP2 describe el 26% de la variación total, la cual esta descrita por seis variables correspondientes al pH del mucilago, pH del cotiledón, pH del grano, humedad, acidez total y grados brix. Lo anterior indica que la variable independiente, en este caso los grupos de suelo, no influyen en los atributos del grano.

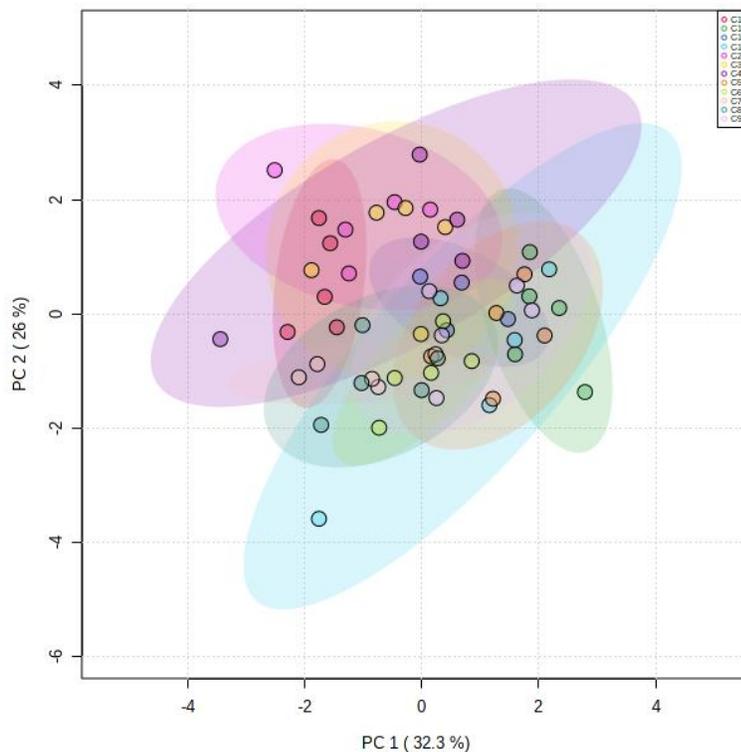


Figura 2.1. Agrupamiento de tres plantaciones de cacao sobre los primeros dos componentes principales (PC1 y PC2).

Por su parte, el análisis de correlación reveló que las variables estudiadas poseen una baja correlación (Figura 2.2), por lo tanto se consideran que son producto de una respuesta independiente de factores que no se incluyeron en el estudio. Independientemente del resultado, resulta importante controlar el pH, la acidez total y el contenido de sólidos solubles totales del mucílago durante las diferentes etapas de postcosecha (Loureiro *et al.*, 2017). En el Cuadro 2.8, se muestran los resultados del análisis químico proximal y variables fisicoquímicas evaluadas en el grano.

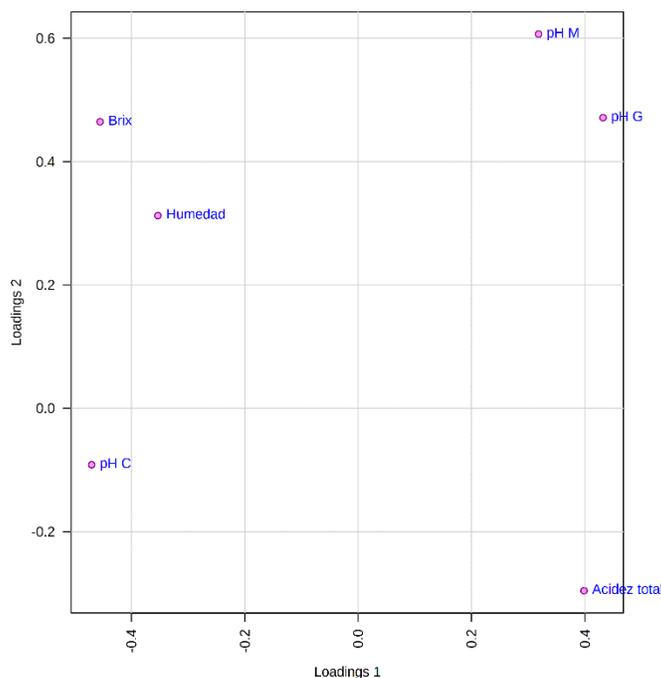


Figura 2.2 Gráfico de correlación de variables fisicoquímicas de granos de cacao.

En esta investigación, el contenido de sólidos solubles del extracto del mucílago de los granos de cacao se encontró que el Sitio 1, fue el que obtuvo un mayor valor promedio de grados brix (18.63°) a diferencia de los Sitios 2 y 3, en los cuales se obtuvieron valores promedios de 17.99° y 17.96° brix, respectivamente. Es de suma importancia el poder determinar esta variable, ya que de ella depende que el proceso de fermentación se realice adecuadamente y así se desarrollen los precursores de aroma y sabor del cacao. Vázquez-Ovando *et al.* (2016) mencionan que los componentes principales del mucílago son agua (82-87%), azúcares (10-15%), pentosanas (2-3%), ácido cítrico (1-3% -la cual está relacionada con el pH del mucílago-) y pectina (1-1.5%). En el

proceso intervienen principalmente levaduras y bacterias de ácido láctico y ácido acético (Pettipher, 1986), que a partir de los azúcares simples (sacarosa, glucosa y fructosa) producen etanol (alcohol) y que, junto con el ácido cítrico, proveniente del mucilago, al permear a la semilla, ocasiona la muerte del embrión, permitiendo así el desarrollo de precursores del sabor y cambios de color (Schwan & Wheals, 2004). Durante la fermentación, los cambios bioquímicos que se producen dentro de la semilla, reducen el amargor y la astringencia, por lo que el realizar el buen procesamiento en esta etapa, es crucial para que la calidad de la semilla no se vea afectada por las altas concentraciones de ácido acético y ácido láctico (Rodríguez-Campos *et al.*, 2011). Al respecto, Ho *et al.* (2014), mencionan en su investigación que se vieron afectados los sabores y olores del chocolate cuando la fermentación estuvo ausente de levaduras, obteniendo mayor contenido de cáscara, granos color violeta violáceo (no estaban completamente marrones), menor producción de etanol, alcoholes superiores y ésteres, a diferencia de los granos fermentados con levadura, donde los granos si obtuvieron el característico color marrón y le dieron al producto final los caracteres típicos preferidos por los paneles sensoriales.

Cuadro 2.8. Análisis químico proximal y fisicoquímicas de granos de cacao en tres sitios de la Chontalpa, Tabasco, México.

Sitios	Cuadrante	Brix	pH mucilago	pH cotiledon	pH grano	humedad	Acidez Total (ml NaOH 0.1 N/g)
Sitio 1	1	18.68±0.08	3.57±0.05	6.37±0.03	5.09±0.12	0.08±0.01	0.81±0.05
	2	18.64±0.15	3.72±0.03	6.34±0.04	5.13±0.18	0.08±0.01	0.78±0.10
	3	18.68±0.13	3.70±0.08	6.30±0.06	5.07±0.06	0.08±0.00	0.89±0.10
	4	18.50±0.07	3.69±0.13	6.34±0.10	5.20±0.20	0.08±0.00	0.86±0.10
Sitio 2	1	17.74±0.18	3.68±0.07	6.29±0.09	5.12±0.05	0.07±0.00	0.89±0.05
	2	18.10±0.07	3.59±0.03	6.33±0.09	5.01±0.09	0.07±0.01	0.94±0.04
	3	18.18±0.11	3.51±0.05	6.32±0.03	4.94±0.15	0.08±0.01	0.81±0.01
	4	17.92±0.15	3.56±0.06	6.31±0.05	4.88±0.10	0.08±0.01	0.84±0.04
Sitio 3	1	18.02±0.22	3.64±0.07	6.33±0.03	5.23±0.18	0.07±0.01	0.87±0.10
	2	17.82±0.08	3.69±0.11	6.27±0.05	5.27±0.08	0.07±0.01	0.97±0.11
	3	18±0.14	3.69±0.02	6.31±0.02	5.13±0.09	0.09±0.00	0.97±0.09
	4	18.02±0.16	3.63±0.16	6.31±0.06	5.02±0.27	0.07±0.01	1.01±0.07

Por su parte, el pH del mucilago de los granos de cacao del Sitio 1 y 3 presentaron valores promedios de 3.67 y 3.66, respectivamente, con respecto al Sitio 2, el cual fue de 3.59. Los valores

anteriores están dentro de los valores promedios reportados por Lagunes-Gálvez *et al.* (2007) para el proceso de fermentación. Cabe recalcar, que el pH está influenciado por la presencia de ácido cítrico (Guzmán-Álvarez y Márquez-Ramos, 2021), el cual, junto con los azúcares del mucilago, son ideales para cultivar levaduras, bacterias ácido láctico y acético para una adecuada fermentación (Ardhana y Fleet, 2003). En cuanto al pH del cotiledón, para los tres sitios de estudio se encontró un pH promedio de entre 6.31-6.34, y con respecto al pH del grano, el Sitio 3 y 1 obtuvieron valores promedios de 5.17 y 5.12, respectivamente; mientras que el Sitio 2, obtuvo un valor de 4.99. Camu *et al.* (2008) mencionan que durante la fermentación es importante que el pH no se vuelva demasiado ácido ($\text{pH} < 4.5$), ya que se verían afectados los precursores del sabor, obteniendo un producto final demasiado ácido, trayendo como consecuencias una baja calidad en el grano. Por su parte, Portillo, Farinas & Betancourt *et al.* (2007), confirman que valores de pH inferiores a 4.5 disminuían el potencial aromático de los granos de cacao. Con respecto a la acidez total se encontró que el Sitio 3 presento valores de 0.95 meq NaOH/g a diferencia de los Sitios 2 y 1, el cual se presentaron valores de 0.87 y 0.84 meq NaOH/g, respectivamente. Estos bajos valores se obtuvieron porque la acidez total se determinó en cotiledón fresco. De acuerdo a Schwan & Wheals (2004) esta variable se determina en granos fermentados debido a que se modifica durante el proceso de fermentación, ya que de acuerdo a Efraim *et al.* (2010) la acidez total en los granos de cacao aumenta durante la fermentación.

Con respecto, al contenido de grasa de los granos de cacao está compuesta principalmente por triglicéridos monoinsaturados, como el ácido oleico, palmítico y esteárico (Lares-Amaiz *et al.*, 2013; Castro *et al.*, 2016). De acuerdo a los resultados obtenidos, en los tres sitios de estudio se obtuvieron valores de entre 50.69 y 50.95%, lo cual resulta idóneo en el procesamiento de tostado, ya que de acuerdo a Vera-Chang *et al.*, (2014), el contenido de grasa de los granos frescos oscila entre los 50 y 57% y luego de ser tostado, el contenido oscila entre 48 y 52%.

2.8 CONCLUSIONES

Las variables morfológicas evaluadas en los tres sitios de estudio revelaron que no existe variabilidad morfológica. Así mismo, las variables fisicoquímicas revelaron que los tres sitios de estudios cuentan con un alto potencial para continuar con la investigación, debido a que los resultados reportados son de valores iniciales en grano fresco, y resultaría interesante el conocer como los valores cambian en los diferentes procesos, tales como fermentación y secado.

CONCLUSIONES GENERALES

La investigación revela que las plantaciones de cacao están establecidas sobre suelos de los grupos Vertisol, Cambisol y Fluvisol. Se presentaron diferencias entre grupos de suelo, teniendo que el suelo Vertisol fue el que presentó mayor fertilidad edáfica.

En cuanto a concentración foliar, los árboles presentan limitaciones en cuanto a los contenidos de nitrógeno y potasio, debido a que ambos elementos son los que más requieren los árboles de cacao para producir.

Se encontró que morfológicamente los frutos y granos de cacao, son similares en los tres sitios de estudio evaluados, por lo que se pertenecen al mismo material genético.

El ACP no describió la variación total, la cual estuvo descrita por los grupos de suelo y los análisis fisicoquímicos de los granos de cacao. Por lo que, indica que la variable independiente, en este caso los grupos de suelo, no influyen en los atributos del grano. Es de suma importancia que se relacionen otros aspectos, tales como la fertilidad edáfica de cada sitio de estudio y determinar si se forman grupos a partir de ella.

Los valores iniciales encontrados en los granos de cacao fresco, están dentro de los rangos para realizar el procesamiento de fermentación.

LITERATURA CITADA

Akinde, B.P., Olakayode, A.O., Oyedele, D.J. & Tijani, F.O. (2020). Selected physical and chemical properties of soil under different agricultural land-use types in Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(9):1-7. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05090>

Alcudía-Aguilar, A., Valenzuela-Que, F., Van Der Wal, H., Villanueva-López, G. & Hernández-Daumas, S. (2009). Densidad de plantación, luz, manejo y productividad de cacaotales en Comalcalco, Tabasco. En Aguilar J. C. E., W. López B., R. Pinto R., J. Galdámez G. y F. Bahena J. (Eds.). *Agricultura Sostenible Vol. 5: agroecología, agricultura orgánica, ganadería sostenible*. Universidad Autónoma de Chiapas: Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 885 p.
Disponibile en: https://www.researchgate.net/publication/281641029_densidad_de_plantacion_luz_manejo_y_productividad_de_cacaotales_en_comalcalco_tabasco

Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F. & Schripsema, J. (2019). Organic phosphorus of soils under cacao agroforests in the Atlantic coast of Brazil. *Geoderma Regional*, 17:1-9.

Almeida, A. A. F. & R. R. Valle. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4): 425-448. Doi: 10.1590 / S1677-04202007000400011

Álvarez, C., Pérez, E. & Lares, M. (2002). Morfología de los frutos y características físico-químicas del mucílago del cacao de tres zonas del estado de Aragua. *Agronomía Tropical*, 52(4), 497-506.

Álvarez-Sánchez, M.E. & Marín-Campos, A. (2011). Manual de procedimientos analíticos para suelo y planta. Laboratorio de Química, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. 65p.

AOAC (Asociation of Official Analytical Chemist). (1995). Official methods of analysis. 18va ed. Gaithersburg, Maryland. USA, 684 p.

Araujo, Q.R., de A. Loureiro, G.A.H.A., Ahnert, D., Escalona-Valdez, R.A. y Baligar, V.C. (2020). Interactions between Soil, Leaves and Beans Nutrient Status and Dry Biomass of Beans and Pod Husk of Forastero Cacao: An Exploratory Study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51:567-581. Doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729369>

Ardhana, M.M. & Fleet, G.H. (2003). The microbial ecology of cocoa bean fermentations in Indonesia. *International Journal of Food Microbiology*, 86(1-2), 87-99. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00081-3)

Arvelo-Sánchez, M.A., González-León, D., Maroto-Arce, S., Delgado-López, T. & Montoya-Rodríguez, P. (2017). Manual técnico del cultivo de cacao: prácticas latinoamericanas. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 143 p.

Báez D.E.Y. (2018). Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (*Cariniana piryformis* M), teca (*Tectona grandis* L.f.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá. Trabajo de grado para optar al grado de Magister en Agroforestería Tropical. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A Maestría en Agroforestería Tropical, Bogotá, Colombia. 81 p.

Bai, S.H., Trueman, S.J., Nevenimo, T., Hannel, G., Bapiwai, P., Poienou, M. & Wallace, H.M. (2017). Effects of shade-tree species and spacing on soil and leaf nutrient concentrations in cocoa plantations at 8 years after establishment.

Agriculture, Ecosystems and Environment, 246:134-143. Doi:
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.003>

- Balemi, T. y K. Negisho. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 12(3):547-562.
- Barrón-García, Y.P., Azpeitia-Morales, A., López-Andrade, P.A. & Mirafuentes-Hernández, F. (2014). Metodología adaptada para la formación de híbridos F1 de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5):765-777.
- Bojórquez, I., Hernández, A., García, D., Nájera, O., Flores, F., Madueño, A. & Bugarín, R. (2007). Características de los suelos cambisoles y fluvisoles de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, 28:19-24.
- Brito-Vega H., Salaya-Domínguez J.M., Gómez-Méndez, E., Gómez-Vázquez, A. & Antele-Gómez J. B. (2018). Physico-chemical Properties of Soil and Pods (*Theobroma cacao* L.) in Cocoa Agroforestry Systems. *Journal of Agronomy*., 17(1):48-55. Doi:10.3923/ja.2018.48.55
- Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 168:521-530. Doi: 10.1002/jpln.200420485
- Camu, N, De Winter, T., Addo, S.K., Takrama, J.S., Bernaert, H & De Vuyst, L. (2008). Fermentation of cocoa beans: influence of microbial activities and polyphenol concentrations on the flavour of chocolate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(13), 2288-2297. Doi: 10.1002 / jsfa.3349
- Cantú-Silva, I. & Yáñez-Díaz, M.I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45):122-151.
- Castillo, E., Alvarez, C. & Contreras, Y. (2018). Caracterización fisicoquímica de la cáscara del fruto de un clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) cosechados en Caucagua estado Miranda, Venezuela. *Revista de Investigación*, 42(95):154-167. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376160247008>
- Castro, M.R., Hernández, J.A., Marcilla, S., Córdova, J.S., Solari, F.A. & Chire, G.C. (2016). Efecto del contenido de grasa en la concentración de polifenoles y capacidad antioxidante de *Theobroma cacao* L. "Cacao". *Ciencia e Investigación*, 19(1), 19-23. Doi: <https://doi.org/10.15381/ci.v19i1.13623>

- Celaya-Michel, H. & Castellanos-Villegas, A.E. (2011). Mineralización del nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3):343-356.
- Cepeda, J. (2020). Tendencias químicas de suelos dominicanos. *Revista Agropecuaria y Forestal*, 9(2):25-42.
- Cornwell, E. (2014). Effects of different agricultural systems on soil quality in Northern Limón province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. 62(3):887-897.
- Corona-Rodríguez, A. 2019. Propiedades químicas de los suelos en el bosque semidecíduo mesófilo de la Estación Experimental Agroforestal de Guisa, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 14(2):263-275.
- Cruz-Macías, W.O., Rodríguez-Larramendi, L.A., Salas-Marina, M.Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M.H. & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38: 475-480. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Cruz-Neto, R.O., Souza-Junior, J.O., Sodr , G.A. y Baligar, V.C. (2015). Growth and nutrition of cacao seedlings influenced by zinc application in soil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(4):1053-1064. Doi: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-238/14>
- Cuanalo, de la C. H. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología. 3^a. Edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo estado de México, México. 40 p.
- De la Cruz-Landero, E., Córdova-Avalos, V., García-López, E., Bucio-Galindo, A. & Jaramillo-Villanueva, J.L. (2015). Manejo agronómico y caracterización socioeconómica del cacao en Comalcalco, Tabasco. *Foresta Veracruzana*, 17: 33-40. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49742125005>
- Díaz-José, O., Aguilar-Ávila, J., Rendón-Medel, R. & Santoyo-Cortés, V.H. (2013). Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria*, 40 (2):279-289. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202013000200004>.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México, D. F., 31/12/2002. 61 p.
- Dogbatse J. A. Godfred K. A. A. Amos K. A. Konlan Q. S. & Amaning A. A. (2021). Effects of Organic and Inorganic Fertilizers on Growth and Nutrient Uptake by

Young Cacao (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of Agronomy*
Volume 2021, 10 pp <https://doi.org/10.1155/2021/5516928>.

- Dogbatse, J.A., Arthur, A., Padi, F.K., Konlan, S., Quaye, A.K., Owusu-Ansah, F. & Awudzi, G.K. (2020). Influence of Acidic Soils on Growth and Nutrient Uptake of Cocoa (*Theobroma Cacao* L.) Varieties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(17):2280-2296. Doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1822384>
- Efrain, P., Pezoa-García, N.H., Jardim, D.C.P., Nishikawa, A., Haddad, R. & Eberlin, M.N. (2010). Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. *Food Science and Technology*, 30, 142-150. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000500022>
- Espinosa-García, J.A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Inurreta-Aguirre, H.D. & Góngora-González, S.F. (2015). Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5):1051-1063.
- Etchevers B., J. D. (1999). Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, 17(3): 209-219.
- Furcal-Beriguete P. (2017). Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, vol. 28, núm. 1. Universidad de Costa.
- Gamarra-Lezcano, C.C., Díaz-Lezcano, M.I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M.P. y Cabrera-Cardùs, A.J.N. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(46):4-26.
- Garbanzo-León, G., B. Alemán-Montes, A. Alvarado-Hernández & C. Henríquez-Henríquez. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, 93:20-41. Doi: <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- Guzmán-Álvarez, R.E. & Márquez-Ramos, J.G. (2021). Fermentation of cocoa beans. En: *Fermentation-Processes, Benefits and Risk*. IntechOpen.
- Ho, V.T., Zhao, J. & Graham, F. (2014). Yeasts are essential for cocoa bean fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 174, 72-87. Doi: [10.1016 / j.ijfoodmicro.2013.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.12.014)

- Illarze, G., del Pino, A., Riccetto, S. & Irisarri, P. (2018). Nitrous oxide emission, nitrification, denitrification and nitrogen mineralization during rice growing season in 2 soils from Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología*, 50:97-104. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.05.004>
- IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes
- Jarquín-Sánchez, A., Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Camacho-Chiu, W. y Guerrero-Peña, A. 2011. Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y quimiometría. *Agrociencia*. 45:653-662.
- Kongor, J.E., Hinneh, M., Walle, D.V., Afoakwa, E.O., Boeckx, P. & Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao* L.) bean flavour profile-A review. *Food Research International*, 82:44-52. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Lagunes-Gálvez, S., Loiseau, G., Paredes, J.L., Barel, M. & Guiraud, J.P. (2007). Study on the microflora and biochemistry of cocoa fermentation in the Dominican Republic. *International Journal of Food Microbiology*, 114, 124-130. Doi: 10.1016 / j.ijfoodmicro.2006.10.041
- Lares-Amaiz, M., Pérez-Sira, E., Álvarez-Fernández, C., Perozo-González, J. & El-Khori, S. (2013). Cambios de las propiedades físico-químicas y perfil de ácidos grasos en cacao de Chuao, durante el beneficio. *Agronomía Tropical*, 63(1-2), 37-47.
- León-Villamar, F., Calderón-Salazar, J. & Mayorga-Quinteros, E. (2016). Estrategias para el cultivo, comercialización del cacao fino de aroma en Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 9(8):45-55.
- López, M., López de Rojas, I., España, M., Izquierdo, A. y Herrera, L. 2007. Efecto de la fertilización inorgánica sobre la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, nivel nutricional de la planta y hongos micorrícicos arbusculares en plantaciones de *Theobroma Cacao*. *Agronomía Tropical*. 57:31-43.
- López-Báez, O., Ramírez-González, S.I., Espinosa-Zaragoza, S., Moreno-Martínez, J.L., Ruiz-Bello, C., Villareal-Fuentes, J.M. & Ruiz-Rojas, J.L. (2015). Manejo agroecológico de la nutrición en el cultivo de cacao. Primera edición digital, Universidad Autónoma de Chapingo, 128 p.
- López-Báez, W., Reynoso-Santos, R., López-Martínez, J., Villar-Sánchez, B., Camas-Gómez, R. & García-Santiago, J.O. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de*

- López-Castañeda A., D. J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, C. A. Ortiz-Solorio, S. Tinal-Ortiz y J. R. Valdez-Lazalde. 2017. Cartografía de suelos en la región de los Ríos, Tabasco, México; uso del modelo digital de elevación Agroproductividad, 10(12):22-28.
- López-Guemez, A.R., Palma-González, B., Hernández-Rivera, M.A., Ojeda-Morales, M.E., Ángeles-Padilla, A., Ruiz-Nájera, J.A. & García-Marín, M.J. (2007). Caracterización fisicoquímica de los suelos predominantes en el estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica*, 34:45-46.
- Loureiro, G.A.H.A., Araujo, Q.R., Valle, R.R., Sodrè, G.A. & Souza, S.M.M. (2017). Influencia de factores agroambientales sobre la calidad del clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) PH-16 en la región cacaotera de Bahía, Brasil. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 579-587. Doi: <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1274>
- Marrocos, P.C.L., de A. Loureiro, G.A.H., de Araujo, Q.R., Sodrè, G.A., Ahnert, D., Escalona-Valdez, R.A. & Baligar, V.C. (2020). Mineral nutrition of cacao (*Theobroma cacao* L.): relationships between foliar concentrations of mineral nutrients and crop productivity. *Journal of Plant Nutrition*. 43(10):1498-1509.
- Marrocos, P.C.L., Loureiro, G.A.H.A, Araujo, Q.R., Sodrè, G.A., Ahnert, D. & Baligar, V.C. (2020b). Mineral nutrient ratios and cacao productivity. *Journal of Plant Nutrition*, 43:2368-2382. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1771582>
- Marrocos, P.C.L., Loureiro, G.A.H.A., Araujo, Q.R., Sodrè, G.A., Ahnert, D., Escalona-Valdez, R.A. y Baligar, V.C. (2020a). Mineral nutrition of cacao (*Theobroma cacao* L.): relationships between foliar concentrations of mineral nutrients and crop productivity. *Journal of Plant Nutrition*, 43:1498-1509. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739295>
- Martínez, E., Fuentes, J.P. & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 8:68-96. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, W.J. (2016). La variabilidad genética del cacao (*Theobroma cacao* L.) nacional boliviano. *Apthapi*, 2:78-84.
- Mendoza R. B. y Espinoza A, Guía Técnica para Muestreo de Suelos. Universidad Nacional Agraria (UNA), programa de Agricultura, Suelo y Agua (ASA). Managua, Nicaragua. 56 pp.
- Montaleza-Armijos, J.F., Quevedo-Guerrero, J.N. & García-Batista, R.M. (2020). Análisis de la diversidad morfológica de cacao (*Theobroma cacao* L.) del jardín

clonal de la Universidad Técnica de Machala. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(2):45-57.

Moreno-Araujo, M.T. (2009). Efecto de la distribución espacial de las propiedades edáficas sobre el manejo de la fertilidad de dos suelos agrícolas. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4):901-911.

Mulia S. McMahon P. J., Purwantara A. Purung H.B. Djufry F. Lambert S. Keane P. J. & Guest D. I. (2017). Effect of organic and inorganic amendments on productivity of cocoa on a marginal soil in Sulawesi, Indonesia. *Experimental Agriculture*, vol. 55, no. 1, pp. 1–20.

Nelson, P.N., Webb, M.J., Berthelsen, S., Curry, G., Yinil, D., Fidelis, C., (2011). Nutritional status of cocoa in Papua New Guinea. ACIAR Technical Reports No. 76. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra 67 pp.

Nielsen, D.S., Crafac, M., Jespersen, L. & Jakobsen, M. (2013). The microbiology of cocoa fermentation. *Chocolate in Health and Nutrition, Nutrition and Health*: 39-60. Doi: 10.1007/978-1-61779-803-0_4

Nigham, P.S. & Singh, A. (2014). Cocoa and coffee fermentations. *Encyclopedia of Food Microbiology*, 484-492. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00074-4>

Obalum, S.E., Chibuike, G.U., Peth, S. & Ouyang, Y. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189:176. Doi: 10.1007/s10661-017-5881-y

Obrador-Olán, J.J., García-López, E. & Calderón-Bolaina, V. (2010). La fertilidad de los suelos en el sistema agroforestal y la fertilización orgánica mineral. En Córdova-Avalos V., E. García-López y J. J. Obrador-Olán (Eds). Cultivo y transformación del cacao en Tabasco. Publicación Especial del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 91 p.

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT). (2021). Consulta en línea: <http://faostat3.fao.org/home/S>. Fecha de consulta: 24 de Mayo 2021.

Palma-López, D. J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zuñiga, F, Gavi-Reyes, F. & Palma-Cancino, D.Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12): 29-35.

Palma-López., D. J., Morales-Garduza, M. A. & Triano-Sánchez, A. (2010). Capítulo 2: Suelos cacaoteros de Tabasco. En Córdova-Avalos V., E. García-López y J. J. Obrador-Olán (Eds). Cultivo y transformación del cacao en Tabasco.

Publicación Especial del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 91 p.

- Papenbrock, J., Pfündel, E., Mock, H.P. & Grimm, B. (2001). Decreased and increased expression of the subunit CHL I diminishes Mg chelatase activity and reduces chlorophyll synthesis in transgenic tobacco plants. *The Plant Journal*, 22(2):155-164. Doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2000.00724.x>
- Pascual-Córdova, G., Obrador-Ólan, J.J., García-López, E., Carrillo-Ávila, E., Sánchez-Soto, S., Guerrero-Peña, A. y Ortiz-García, C.F. 2017. Evaluación del sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante indicadores de calidad de suelo en Tabasco, México. *Agroproductividad*. 10(12):36-42.
- Pérez-Sosa E. & Granados-Ramírez, G.R. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Revista de Investigación en Geografía*, 3:39-67. Doi: <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Pettipher, G.L. (1986). Analysis of cocoa pulp and the formulation of a standardised artificial cocoa pulp medium. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 37(3), 297-309. Doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740370315>
- Pool-Novelo, L., Trinidad-Santos, A., Etchevers-Barra, J.D., Pérez-Moreno, J. & Martínez-Garza, A. (2000). Mejoradores de la fertilidad del suelo en la agricultura de ladera de los altos de Chiapas, México. *Agrociencia*, 34(3):251-259.
- Portillo, E., Graziani de Farinas, L. & Betancourt, E. (2007). Análisis químico del cacao criollo porcelana (*Theobroma cacao* L.) en el sur del lago de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 24(3), 522-546.
- Prabhakaran-Nair, K.P. (2010). Chapter 5: Cocoa (*Theobroma cacao* L.). *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*, 131-180 p. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384677-8.00005-9>
- Pramanik, P., Ghosh, G.K., Ghosal, P.K. & Banik, P. (2007). Changes in organic – C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology*, 98(13):2485-2494. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.017>
- Puentes-Páramo, Y.J., Menjivar-Flores, J.C. & Aranzazu-Hernández, F. (2016). Concentración de nutrientes en hojas, una herramienta para el diagnóstico nutricional en cacao. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2):329-336.
- Ramírez, G., S.I. (2008). La moniliasis un desafío para lograr la sostenibilidad del sistema cacao en México. *Tecnología en Marcha*, 21(1): 97-110.

- Ramírez-Guillermo, M.Á., Lagunes-Espinoza, L.C., Ortiz-García, C.F., Gutiérrez, O.A. y Rosa-Santamaría, R. (2018). Variación morfológica de frutos y semillas de cacao (*Theobroma cacao* L.) de plantaciones en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(2):117-125. Doi: <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.117-125>
- Ramos-Reyes, R., D. J. Palma-López, C. A. Ortiz-Solorio, C. F. Ortiz-García y G. Díaz-Padilla. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22(3): 267- 278.
- Rangel-Mendoza, J.A. y Silva-Parra, A. (2020). Agroforestry systems of *Theobroma cacao* L. affects soil and leaf litter quality. *Colombia Forestal*, 23(2):75-88.
- Ribeiro, M.A.Q., De Almeida, A.A.F, Mielke, M.S., Gomes, F.P., Pires, M.V. & Baligar, V.C. (2013). Aluminum effects on growth, photosynthesis, and mineral nutrition of cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition*. 36(8):1161-1179.
- Rodríguez-Campos, J., Escalona-Buendía, H.B., Orozco-Ávila, I., Lugo-Cervantes, E. & Jaramillo-Flores, M.E. (2011). Dynamics of volatile and non-volatile compounds in cocoa (*Theobroma cacao* L.) during fermentation and drying processes using principal components analysis. *Food Research International*, 44(1), 250-258. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.028>
- Rojas-Molina, J., Ortiz-Cabralez, L., Escobar-Pachajoa, L., Rojas-Buitrago, M. & Jaimes-Suarez, Y. (2021). Producción de hojarasca y su aporte de nutrientes en cacao bajo diferentes esquemas de fertilización, Rionegro-Santander. *Agronomía Costarricense*. 45:193-206.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y.Z. & Menjivar-Flores, J.C. (2019). Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 20:5-16.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y.Z & Menjivar-Flores, J.C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 24:1-10. Doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- Rosas-Patiño, G., Rodríguez-Pérez, W. & Muñoz-Ramos, J. (2012). Caracterización edafológica de lomeríos bajo sistema agroforestal y rastrojo en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual, Caquetá-Colombia. *Momentos de Ciencia*. 9(2):153-161.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. & R.D., Zapata-Hernández. (2015). Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*, 63(2):79-89.

- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L.E. & González-Durán, I.J.L. (2009). La fertilización de sitio específico mejoró la productividad del aguacate 'Hass' en huertos sin riego. *Agricultura Técnica en México*, 35(4):439-448.
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L.C., Martínez-Sánchez, J.L., Sánchez-Hernández, R. & Valdés-Velarde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques*, 25:1-14. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Salvador-Morales, P., Sánchez-Hernández, R., Sánchez-Gomez, D., López-Noverola, U., Alejo-Santiago, G., Valdés-Velarde, E., Gallardo-Lancho, J.F. (2017). Evolution of soil organic carbon during a chronosequence of transformation from cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation to grassland. *Acta Agronómica*, 66(4):525-530. Doi: DOI: 10.15446 / ACAG.V66N4.62543
- Sánchez-Gutiérrez, F., Pérez-Flores, J., Obrador-Olán, J.J., Sol-Sánchez, Á. & Ruiz-Rosado, O. (2016). Árboles maderables en el sistema agroforestal de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (15):2711-2723.
- Sarbu, I. & Csutak, O. (2019). The microbiology of cocoa fermentation. *Caffeinated and Cocoa Based Beverages*, 8:423-446. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815864-7.00013-1>
- Schroeder, M. A., López, A. E. & Martínez, G.C. (2005). Resultados preliminares del análisis foliar de algunas especies medicinales del nordeste argentino. *Agrotecnia*, 15: 8-11.
- Schwan, R.F. & Wheals, A.E. (2004). The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 44(4), 205-211. Doi: 10.1080 / 10408690490464104.
- Schweizer L, S. (2011). Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. San José de Costa Rica: INTA/MAG, 18 p.
- Sharma K.L. (2011). Effect of agroforestry systems on soil quality—monitoring and assessment, Central Research Institute for Dryland Agriculture. <http://www.crida.in/DRM1-WinterSchool/KLS.pdf> (Accessed on 10/11/2021).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). Consulta en línea: www.siap.gob.mx. Fecha de consulta: 25 de Mayo de 2021.

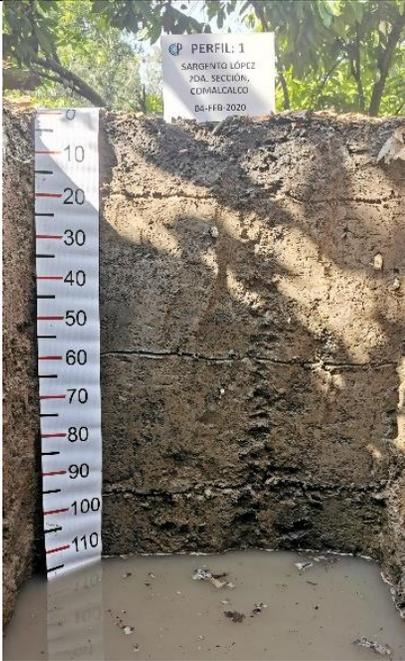
- Singh K. Sanderson T. Field D. Fidelis C. & Yinil D. (2019). Soil security for developing and sustaining cocoa production in Papua New Guinea. *Geoderma Regional* 17.
- Sotelo R., E., Gutierrez C., M.C., Cruz B., G., Ortiz S., C.A. & Segura C., M.A. (2008). Historia y desarrollo de la clasificación de vertisoles en el sistema FAO y la taxonomía. *Terra Latinoamericana*, 26(4):325-332.
- Soto-Mora, E.S., Hernández-Vázquez, M., Luna-Zendejas, H.S., Ortiz-Ortiz, E. & García-Gallegos, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(5):98-102.
- Suárez, G.M., Florido-Bacallao, R., Soto-Carreño, F. & Caballero-Núñez, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, 34(2):30-37.
- Tester, M. & Davenport, R. (2003). Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of botany*, 91(5):503-527.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton & J.H. Havlin. (1993). Soil fertility and fertilizers. MacMillan. New York.
- Torres De La Cruz, M., Ortiz-García, C.F., Téliz-Ortiz, D., Mora-Aguilera, A. & Nava-Díaz, C. (2013). Efecto de Azoxystrobin sobre *Moniliophthora roreri*, agente causal de la moniliasis del cacao (*Theobroma cacao*). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31:65-69.
- Torres-Benítez, A.J., Esquivel, H.E. & Tinoco, F. (2017). Composición física y química de los suelos fluviovolcánicos de Armero Tolima, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158):119-126. Doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.447>
- Turner B.B. (1991). Fertilizers and their Efficient use. International Fertilizers Industry Assotiation (IFA), Paris, France, 697 pp.
- UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales). (2011). Proyecto cacao. Disponible en: <https://www.upov.int/edocs/tgdocs/es/tg270.doc>
- Valbuena-Calderón, C.A., Martínez-Martínez, L.J. & Giraldo-Henao, R. (2008). Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 30(4):1146-1151. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000400049>

- Van Vliet J. A., Maja S. & Ken E. G. (2015). Mineral Nutrition of Cocoa. A Review. 57 pp. Wageningen University and Research Centre, Wageningen. 57 pp.
- Vanderschueren, R., Montalvo, D., Ketelaere, B., Delcour, J.A. & Smolders, E. (2019). The elemental composition of chocolates is related to cacao content and origin: A multi-element fingerprinting analysis of single origin chocolates. *Journal of Food Composition and Analysis*, 83:103277. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103277>
- Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D. & Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3), 239-254.
- Vera-Chang, J., Vallejo-Torres, C., Pàrraga-Moran, D., Morales-Rodríguez, W., Macías-Véliz, J. & Ramos-Remache, R. (2014). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21-34.
- Wartenberg, A.C., Blaser, W.J., Gattinger, A., Roshetko, J.M., Van Noordwijk, M.V. & Six, J. (2017). Does shade tree diversity increase soil fertility in cocoa plantations?. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 248:190-199. Doi: [10.1016 / j.agee.2017.07.033](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.033)
- Zavala-Cruz, J., R. Jiménez R., D. J. Palma-López, F. Bautista Z. & F. Gavi R. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8):161-171.
- Zhu, J., Li, M. & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of The Total Environment*, 612:522-537.

ANEXOS

Clasificación de grupo de suelo: Eutric Gleyic Cambisol (Clayic). CM-gl.eu-ce

Perfil: 1
 Fecha: 04/02/2020.
 Productor: Santiago Gómez.
 Localidad: Sargento López, Segunda Sección, Comalcalco, Tabasco.
 Localización: 445143, 927003.
 Elevación: 9 m.s.n.m.
 Pendiente: Ligera pendiente menor al 1%.
 Relieve: Plano.
 Drenaje del Sitio: Normal.
 Aplicación de riego o drenaje: Drenaje parcelario.
 Drenaje del Perfil: Bien drenado.
 Manto freático visible: Si.
 Material Parental: Aluviones estables del Cuaternario Reciente.
 Flora Cultivada: Cacao bajo sistema tradicional con árboles de sombra.
 Flora Nativa: Selva mediana inundable.
 Fauna: Gallinas, peas.
 Observaciones: Día despejado. En el primer horizonte se observa hojas y materia orgánica.

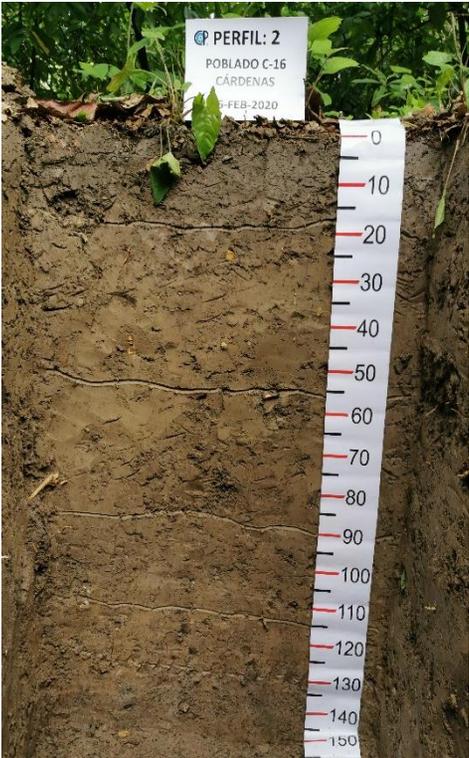
Perfil 1	Horizonte (cm)	Descripción del perfil
	A ₁ (00-20)	Transición, media y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, negro (2.5Y 1/2.5); sin motas; textura, migajón arcilloso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares y angulares, finas y medias; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros, numerosos, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, rápida; raíces, comunes, finas, delgadas, medias y gruesas; fauna, presencia de lombrices y rastros de actividad de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	B _{wg} (20-62)	Transición, tenue y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y 3/2); motas, gris verdusco muy oscuro (10Y 3/1), marcadas, comunes, finísimas, muy finas y finas; textura, arcilla limosa; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares y angulares, finas y medias; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, pegajoso y muy plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros, numerosos, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, moderada; raíces, comunes, finas, delgadas, medias y gruesas; fauna, presencia de lombrices y rastros de actividad de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 7.
	C _{g1} (62-98)	Transición, tenue y horizontal; humedad, saturado; color de matriz, pardo oliva (2.5Y 4/3); motas, negro verdusco (5GY 2.5/1), tenues, comunes, finísimas y muy finas; textura, arcilla limosa; estructura, moderadamente desarrollada, bloques subangulares y angulares, muy finas, finas y medias; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, pegajoso y muy plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, moderada; raíces, pocas, medias y gruesas; fauna, presencia de lombrices y rastros de actividad de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.
	C _{g2} (98-133)	Humedad, saturado; color de matriz, pardo oliva (2.5Y 4/3); motas, negro verdusco (10Y 2.5/1), marcadas, comunes, finas, medias y grandes; textura, migajón arcillo limoso; estructura, moderadamente desarrollada, bloques subangulares, finas y medias; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, pegajoso y muy plástico; nódulos, pocos, medianos, pardo amarillento, subangulares, blandos de óxidos de hierro con limo; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, lenta; raíces, pocas y delgadas; presencia de lombrices y rastros de actividad de lombrices; pH 7.

Resultados de laboratorio:

Ho.	Prof. (cm)	DA (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O) relación 1:2	CE (dS m ⁻¹)	MO	N	P (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	% CO	PSB	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
					%			cmol (+) kg ⁻¹						%				
1	00-20	1.18	6.25	0.06	2.68	0.12	9.92	0.12	12.81	1.05	0.10	23.98	1.55	58.715596	30	48	22	Franco arcilloso
2	20-62	1.37	5.74	0.04	1.51	0.10	8.52	0.10	12.18	0.76	0.09	23.16	0.87	56.692573	36	44	20	Franco arcilloso
3	62-98	1.39	5.61	0.03	0.94	0.06	5.34	0.08	11.01	0.44	0.06	22.86	0.54	50.699913	32	48	20	Franco arcilloso
4	98-113	1.38	4.91	0.03	0.47	0.04	5.05	0.05	10.87	0.35	0.04	22.65	0.27	49.933775	12	54	34	Franco limoso

Clasificación de grupo de suelo: Haplic Vertisol (Hypereutric, Gleyic). VR.ha-je.gl.

Perfil: 2
 Fecha: 06/02/2020.
 Productor: Armando Leyva.
 Localidad: Poblado C-16, Cárdenas, Tabasco.
 Localización: 448074, 2006067.
 Elevación: 17 m.s.n.m.
 Pendiente: Ligera pendiente del 1% hacia el Norte.
 Relieve: Plano.
 Drenaje del Sitio: Normal.
 Aplicación de riego o drenaje: Drenaje parcelario aproximadamente a 100 metros entre drenes y de 30 a 40 cm de profundidad.
 Drenaje del Perfil: Pobremente drenado.
 Manto freático visible: No.
 Material Parental: Aluviones estables del Cuaternario Reciente.
 Flora Cultivada: Cacao con árboles de sombra de Mote, Guasimo, Pataste.
 Flora Nativa: Selva mediana perennifolia.
 Fauna: Hormigas.
 Observaciones: Día nublado. Se encontró presencia de ligero agrietamiento en la superficie del suelo que se prolonga alrededor de 1 metro.

Perfil 2	Horizonte (cm)	Descripción del perfil
	A ₁ (00-19)	Transición, media y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); sin motas; textura, arcilla limosa; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares y angulares, finas y medias; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros, numerosos, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, moderada; raíces, abundantes, finas, delgadas y medias; abundante actividad biológica, presencia de lombrices, arañas, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	B _w (19-55)	Transición, tenue y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, pardo fuerte (7.5YR 5/8); motas, gris oscuro (7.5YR 4/1), marcadas, comunes, muy finas y finas y medias; textura, arcillosa; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares y angulares, finas y medias; consistencia en húmedo muy firme y cuando muy húmedo, pegajoso y muy plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esferoides, blandos de carbón; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, lenta; raíces, comunes, finas, delgadas, medias y gruesas; fauna, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	C _{g1} (55-90)	Transición, tenue y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, gris verdoso (10Y 6/1); motas, amarillo rojizo (5YR 7/6), marcadas, comunes, muy finas y finas y medias, negro (N 2.5/1), marcadas, pocas y muy finas; textura, arcillosa; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas y medias; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esferoides, blandos de carbón; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, comunes, finas, delgadas y medias; fauna, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	C _{g2} (90-115)	Transición, tenue y horizontal; humedad, húmedo; color de matriz, gris muy oscuro (N 3/1); motas, pardo fuerte (7.5YR 5/8), marcadas, comunes, muy finas, finas y medias y motas, pardo (7.5YR 5/3), marcadas, pocas y muy finas; textura, arcillosa; pedregosidad, ligeramente pedregoso, del tamaño de grava, subangulares de caliza con reacción al HCl, calcáreo, fácilmente audible, efervescencia moderada y fácilmente visible; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas y medias; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, muy pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esferoides, blandos de Mn con efervescencia al H ₂ O ₂ ; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, muy ligeramente calcáreo, de apenas atenuadamente audible y sin ningún efecto visible de la efervescencia; pH 7.
	C _{g3} (115-150)	Humedad, húmedo; color de matriz, gris azulado oscuro (5B 4/1); motas, negro verdusco (5GY 2.5/1), marcadas, comunes, muy finas, finas y medias y motas, pardo rojizo claro (5YR 6/4), marcadas, pocas y muy finas; textura, arcillosa; pedregosidad, ligeramente pedregoso, del tamaño de grava, subangulares de caliza con fuerte reacción al HCl, calcáreo, fácilmente audible, efervescencia moderada y fácilmente visible; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares y angulares, finas y medias; consistencia en húmedo, muy firme y cuando muy húmedo, muy pegajoso y muy plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, pocos, muy pequeños, negros, esferoides, blandos de Mn con efervescencia al H ₂ O ₂ ; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas, delgadas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, ligeramente calcáreo, tenuemente audible, con ligera efervescencia apenas visible; pH 7.

Resultados de laboratorio:

Ho.	Prof. (cm)	DA (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O) relación 1:2	CE (dS m ⁻¹)	MO	N	P (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	% CO	PSB	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
					%			cmol (+) kg ⁻¹						%				
1	00-19	1.07	6.20	0.09	2.45	0.10	8.99	0.12	11.89	0.90	0.08	22.18	1.42	58.566276	42	44	14	Arcilla limosa
2	19-55	1.28	6.09	0.05	1.41	0.08	8.05	0.11	11.31	0.81	0.08	22.02	0.82	55.903724	50	38	12	Arcilla
3	55-90	1.31	5.94	0.04	1.07	0.08	6.87	0.09	10.93	0.50	0.06	21.87	0.62	52.949246	52	32	16	Arcilla
4	90-115	1.25	5.72	0.04	0.98	0.06	5.22	0.06	10.21	0.30	0.03	21.61	0.57	49.051365	56	30	14	Arcilla
5	115-150	1.28	5.41	0.03	0.28	0.05	4.15	0.03	9.88	0.20	0.02	20.98	0.16	48.28408	56	30	14	Arcilla

Clasificación de grupo de suelo: Gleyic Eutric Fluvisol (Loamic). FL-gl.eu-lo.

Perfil: 3
 Fecha: 22/06/2020.
 Productor: Eduardo.
 Localidad: R/a Río Seco y Montaña, Tercera Sección, Cunduacán, Tabasco.
 Localización: 472705.912, 2007451.342.
 Elevación: 16 m.s.n.m.
 Pendiente: Ligera pendiente menor al 1%.
 Relieve: Plano.
 Drenaje del Sitio: Normal.
 Aplicación de riego o drenaje: Sin riego y sin drenaje.
 Drenaje del Perfil: Pobremente drenado.
 Manto freático visible: No.
 Material Parental: Aluviones estables del Cuaternario Reciente.
 Flora Cultivada: Cacao con árboles de sombra.
 Flora Nativa: Selva mediana perennifolia.
 Fauna: Hormigas, arañas, alacranes.
 Observaciones:

Perfil 3	Horizonte (cm)	Descripción del perfil
	A ₁ (00(6-12))	Transición, media y ondulada; humedad, húmedo; color de matriz, pardo muy oscuro (10YR 2/2); sin motas; textura, migajón limoso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, ligeramente pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros, numerosos, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, moderada; raíces, abundantes, finas, delgadas y medias; abundante actividad biológica, presencia de lombrices, arañas, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	A ₂ (6-12(24-32))	Transición, media y ondulada; humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo oscuro (10 YR 3/3); motas, pardo amarillento (10YR 5/8), prominentes, comunes, finas y medias; textura, migajón limoso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, ligeramente pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esféricos, blandos de carbón; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, lenta; raíces, comunes, finas, delgadas, medias y gruesas; fauna, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	C _g (24-32(55))	Transición, media y horizontal; humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo amarillento oscuro (10YR 4/8); motas, gris (2.5Y 5/1), marcadas, muchas, finas y medias, y motas, pardo fuerte (7.5 YR 4/6), tenues, comunes, muy finas, finas y medias; textura, migajón arcilloso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, muy finas, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, ligeramente pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, espesos, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esféricos, blandos de carbón; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, comunes, finas, delgadas y medias; fauna, hormigas y deyecciones de lombrices; nula reacción al HCl y al H ₂ O ₂ en la matriz del suelo; pH 6.5.
	C ₁ (55-73)	Transición, media y horizontal; humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo amarillento (10 YR 4/4); motas, pardo fuerte (7.5YR 4/6), marcadas, muchas, finas y medias y motas, gris (2.5 Y 5/1), marcadas, comunes, muy finas y finas; textura, migajón arcillo arenoso; estructura, moderadamente desarrollada, bloques subangulares, muy finas, finas y medias; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, pegajoso y muy plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esféricos, blandos de Mn con efervescencia al H ₂ O ₂ ; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, muy ligeramente calcáreo, de apenas atenuamente audible y sin ningún efecto visible de la efervescencia; pH 7.
	C _{g2} (73-88)	Transición, media y horizontal; humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2); motas, pardo amarillento (10 YR 5/8), marcadas, muchas, medias y grandes, y motas, pardo rojizo oscuro (10YR 3/4), marcadas, pocas, finísimas y muy finas; textura, migajón arcillo limoso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, ligeramente pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esféricos, blandos de Mn con efervescencia al H ₂ O ₂ ; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, muy ligeramente calcáreo, de apenas atenuamente audible y sin ningún efecto visible de la efervescencia; pH 7.
	C _{g3} (88-112)	Transición, media y horizontal; humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo amarillento oscuro (10 YR 4/6); motas, gris pardusco (10 YR 6/2), marcadas, comunes, finas, medias y grandes, y motas, pardo fuerte (7.5YR 4/6), marcadas, pocas, finísimas y muy finas; textura, migajón arcillo arenoso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, friable y cuando muy húmedo, pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy

pequeños, negros, esferoides, blandos de Mn con efervescencia al H₂O₂; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, muy ligeramente calcáreo, de apenas atenuadamente audible y sin ningún efecto visible de la efervescencia; pH 7

C₂
(112-150)

Humedad, ligeramente húmedo; color de matriz, pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2); motas, pardo amarillento (10 YR 4/6), marcadas, muchas, finas, medias y grandes, y motas, pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2), tenues, pocas, finísimas y muy finas; textura, migajón arcillo limoso; estructura, fuertemente desarrollada, bloques subangulares, finas, medias y grandes; consistencia en húmedo, firme y cuando muy húmedo, pegajoso y plástico; cutanes, planchado por presión, continuos, delgados, en cara de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos, muy pocos, muy pequeños, negros, esferoides, blandos de Mn con efervescencia al H₂O₂; poros, frecuentes, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares; permeabilidad, muy lenta; raíces, pocas, finas y medias; sin fauna; reacción al HCl en la matriz del suelo, muy ligeramente calcáreo, de apenas atenuadamente audible y sin ningún efecto visible de la efervescencia; pH 7

Resultados de laboratorio:

Ho.	Prof. (cm)	DA (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O) relación 1:2	CE (dS m ⁻¹)	MO	N	P (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	% CO	PSB	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
														cmol (+) kg ⁻¹				
1	(00(6-12)		6.48	0.13	2.92	0.14	11.13	0.26	14.45	2.15	0.15	27.41	1.69	62.057643	16	56	28	Franco limoso
2	(6-12(24-32)		6.12	0.10	1.85	0.12	10.22	0.22	12.31	1.46	0.13	24.11	1.07	58.564911	22	54	24	Franco limoso
3	(24-32(55)		5.98	0.09	1.00	0.10	8.08	0.18	11.88	1.02	0.11	22.77	0.58	57.927097	18	58	24	Franco limoso
4	55-73		5.53	0.08	0.88	0.09	6.53	0.15	10.91	0.96	0.10	20.89	0.51	58.018191	14	72	14	Franco limoso
5	73-88		5.40	0.06	0.54	0.05	5.52	0.15	10.22	0.80	0.09	20.03	0.31	56.215676	22	52	26	Franco limoso
6	88-112		5.16	0.04	0.37	0.05	5.05	0.12	9.53	0.64	0.07	18.65	0.21	55.549598	14	70	16	Franco limoso
7	112-150		5.05	0.02	0.20	0.04	3.88	0.10	8.18	0.41	0.04	17.86	0.12	48.880179	30	56	14	Franco arcillo-limoso

