 Vigilada Mineducación	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): CARLOS ANDRES APELLIDOS: HINESTROZA MENDOZA

FACULTAD: CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AGRONÓMICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): EDGAR ALFONSO APELLIDOS: RODRIGUEZ ARAUJO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN DE LAS RAÍCES EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

RESUMEN

En el presente estudio, se evaluó la resistencia del suelo a la penetración de las raíces en 10 cultivos de arroz, café, cacao y palma de aceite. Además, se les determinó la compactación, densidad aparente, densidad real, límites de consistencia, textura, humedad volumétrica y porosidad, dando como resultado que, en promedio, el cultivo de cacao presentó mayor resistencia a la penetración y mayor densidad real. Se planteó como objetivo principal Evaluar algunas características físicas de los suelos (resistencia del suelo a la penetración de las raíces) en diferentes sistemas de producción agrícola de Norte de Santander. Se llegó a la conclusión de que el cultivo de arroz presentó los mayores valores de humedad volumétrica y densidad aparente; para el caso del cultivo de palma de aceite, se obtuvo el mayor valor del límite líquido y compactación. También se encontró mayor porosidad en el cultivo de arroz, atribuyéndose este hecho, a los procesos de mecanización a los cuales son sometidos estos suelos. y para el cultivo de cacao, la propiedad que presenta variación positiva son las texturas arcillosas, y las propiedades que se pueden considerar de alarma son, la humedad volumétrica, porosidad y texturas arenosas.

PALABRAS CLAVE: Suelo, Penetración de raíces, sistemas de producción, densidad aparente

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 88 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 19 CD ROOM: 1

**\*\*Copia No Controlada\*\***

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN DE LAS  
RAÍCES EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

CARLOS ANDRES HINESTROZA MENDOZA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN DE LAS  
RAÍCES EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

CARLOS ANDRES HINESTROZA MENDOZA

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Agrónomo.

Director:

EDGAR ALFONSO RODRIGUEZ ARAUJO

Ingeniero agrónomo, PhD. en Ciencias Agrarias con énfasis en Suelos y Aguas

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023



## ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** Viernes 08 de septiembre de 2023

**HORA:** 4:00 p.m.

**LUGAR:** Salón SC-302

**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA AGRONÓMICA

**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:** "EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN DE LAS RAÍCES EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA".

**MODALIDAD:** INVESTIGACIÓN

**JURADOS:** PABLO EMILIO SANTOS CORREA  
VÍCTOR HUGO ACEVEDO VELANDÍA  
ANA MILENA GÓMEZ SOTO

**DIRECTOR:** EDGAR ALFONSO RODRÍGUEZ ARAÚJO

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:**  
CARLOS ANDRES HINESTROZA MENDOZA

**CÓDIGO:** 1620782

**CALIFICACIÓN:** 4.0 (Cuatro punto cero)

**OBSERVACIONES:** APROBADO

**FIRMA DE LOS JURADOS:**

Pablo Emilio S.  
PABLO EMILIO SANTOS C.

Víctor Hugo Acevedo V.  
VÍCTOR HUGO ACEVEDO V.

Ana Milena Gómez S.  
ANA MILENA GÓMEZ S.

Edgar Rodríguez A.  
Vo. Bo. Coordinador Comité Curricular

## **Dedicatoria**

Dedico a mis padres y hermanos, por apoyarme, formarme, y ser la más grande motivación para poder alcanzar todos mis propósitos.

## **Agradecimientos**

Le agradezco, primeramente a Dios, a mis padres y hermanos, por ser la motivación constante para poder alcanzar esta meta y por convertirse en el apoyo que tuve en cada momento difícil; a mi director, el ingeniero Edgar Alfonso Rodríguez Araujo, por su instrucción durante el desarrollo de esta investigación, y a la Universidad Francisco de Paula Santander, por brindarme el apoyo con los materiales y equipos necesarios para la ejecución de este proyecto. Agradezco también a todos los agricultores que me dieron el espacio para la toma de muestras y por su voto de confianza.

## **Resumen**

En el presente estudio, se evaluó la resistencia del suelo a la penetración de las raíces en 10 cultivos de arroz, café, cacao y palma de aceite. Además, se les determinó la compactación, densidad aparente, densidad real, límites de consistencia, textura, humedad volumétrica y porosidad, dando como resultado que, en promedio, el cultivo de cacao presentó mayor resistencia a la penetración y mayor densidad real. El cultivo de arroz presentó los mayores valores de humedad volumétrica y densidad aparente; para el caso del cultivo de palma de aceite, se obtuvo el mayor valor del límite líquido y compactación. También se encontró mayor porosidad en el cultivo de arroz, atribuyéndose este hecho, a los procesos de mecanización a los cuales son sometidos estos suelos.

Palabras clave: Resistencia a la penetración, densidad aparente, densidad real, límites de consistencia, textura, humedad volumétrica.

## **Abstract**

In the present study, the resistance of the soil to root penetration was evaluated in 10 crops of rice, coffee, cocoa and oil palm. In addition, the compaction, apparent density, real density, limits of consistency, texture, volumetric humidity and porosity were determined, giving as a result that on average the cocoa crop presented greater resistance to penetration and greater real density, the rice crop presented the highest values of volumetric humidity and apparent density, in the case of oil palm cultivation, it obtained the highest value of the liquid limit and compaction. Greater porosity was also found in rice cultivation, for which this fact is attributed to the mechanization processes to which these soils are subjected.

Keywords: resistance to penetration, apparent density, true density, consistency limits, texture, volumetric humidity.



## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción	16
1. Problema	18
1.1 Título	18
1.2 Planteamiento del problema	18
1.3 Formulación del problema	19
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo General	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
1.5 Justificación	19
1.6 Alcances y limitaciones	20
1.6.1 Alcances.	20
1.6.2 Limitaciones.	21
1.6.2.1 Limitaciones ambientales.	21
1.6.2.2 Limitaciones administrativas	21
1.7 Delimitaciones	21
1.7.1 Delimitación Espacial.	21
1.7.2 Delimitación Temporal.	21
1.7.3 Delimitación Conceptual.	21
2. Marco referencial	22
2.1 Antecedentes	22
2.1.1 Antecedentes Bibliográficos	23
2.2 Marco teórico	24

2.2.1 Ley de la Relatividad.	25
2.2.2 Densidad aparente.	26
2.2.3 Densidad real.	26
2.2.4 Humedad.	26
2.2.5 Límite de consistencia líquido.	27
2.2.6 Penetrómetro.	27
2.2.7 Suelo.	27
2.2.8 Resistencia a la penetración.	28
2.2.9 Textura.	28
2.2.10 Tetra kit o medidor de humedad.	28
2.2.11 Torcómetro.	29
2.3 Marco conceptual	29
2.3.1 Agricultura sustentable.	29
2.3.2 Conservación de suelos.	29
2.3.3 Degradación de los suelos.	29
2.3.4 Fertilidad del suelo.	30
2.4 Marco contextual	30
2.4.1 Delimitación y características geográficas de Norte de Santander	30
2.4.2 Demografía y población	31
2.4.3 Economía	32
2.5 Marco legal	33
3. Diseño metodológico	36
3.1 Tipo de investigación	36
3.2 Población y muestra	36
3.2.1 Población	36

3.2.2 Muestra	36
3.3 Hipótesis	36
3.4 Variables dependientes	37
3.5 Fases de la investigación	37
3.5.1 Toma de muestras	37
3.5.2 Determinación de la resistencia a la penetración	38
3.5.3 Determinación de la humedad volumétrica	39
3.5.4 Determinación de la densidad aparente $D_a$ . (método del terrón parafinado)	39
3.5.5 Determinación de la densidad real $D_r$ . (método del picnómetro).	40
3.5.6 Determinación de la textura (método de Bouyoucos).	41
3.5.7 Determinación de límites de consistencia (método líquido)	44
3.6 Instrumentos para la recolección de información	45
3.7 Técnicas de análisis y procesamiento de datos	45
4. Resultados y discusión	47
4.1 Determinación de la resistencia a la penetración	47
4.2 Determinación de densidad Aparente $D_a$ . y $D_r$ .	48
4.3 Determinación de humedad volumétrica	51
4.4 Determinación de textura	52
4.5 Determinación de límites de consistencia	53
4.6 Análisis de componentes principales (ACP)	54
5. Conclusiones	60
6. Recomendaciones	61
7. Referencias bibliográficas	62
Anexos	68

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Definición de los separados del suelo.	28
Tabla 2. Procedimiento MEANS	55
Tabla 3. Matriz de covarianza	59

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Toma de muestras. a. Recolección de la muestra en doble funda plástica. b. Tarjeta de identificación	38
Figura 2. Determinación de la resistencia a la penetración	38
Figura 3. Determinación de humedad volumétrica	39
Figura 4. Determinación de la densidad aparente $D_a$ . a. Peso del terrón sin parafina. b. Terrón sumergido en parafina	40
Figura 5. Determinación de la densidad real $D_r$ . a. Peso del picnómetro vacío con tapa. b. Peso picnómetro con tapa más muestra. c. peso picnómetro con tapa más muestra más agua. d. Peso picnómetro con tapa más agua.	41
Figura 6. Triángulo textural.	43
Figura 7. Determinación de la textura. a. Peso de la muestra en el vaso de la batidora. b. Batido de la muestra por 15 minutos. c. traslado de la suspensión del vaso de la batidora al cilindro graduado.	43
Figura 8. Determinación de límites de consistencia. a. Peso de la muestra en la lámina de acero. b. Determinación del límite líquido. c. Determinación del límite plástico	45
Figura 9. Resistencia a la penetración.	48
Figura 10. Densidad aparente.	49
Figura 11. Densidad real.	50
Figura 12. Humedad volumétrica	52
Figura 13. Distribución de clases texturales.	53
Figura 14. Límites de consistencia.	54

Figura 15. Análisis de componentes principales (ACP). El eje X, separa la humedad y contenido de arcillas versus (vs) resistencia a la penetración y compactación.	56
Figura 16. Análisis de componentes principales (ACP). El eje Y, separa resistencia a la penetración y compactación vs, texturas arenosas.	56
Figura 17. Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de arroz.	57
Figura 18. Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de cacao.	58
Figura 19. Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de palma.	58

## Lista de anexos

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Resistencia del suelo a la penetración de las raíces	69
Anexo 2. Clasificación de la porosidad total del suelo	71
Anexo 3. Procedimiento de correlación estadísticos simples (ACP)	72
Anexo 4. Matriz de correlación (ACP)	73
Anexo 5. Autovalores de la matriz de correlación (ACP)	74
Anexo 6. Autovalores de la matriz de covarianza (ACP)	75
Anexo 7. Análisis Clúster (ACP)	76
Anexo 8. Procedimiento TREE (ACP)	79
Anexo 9. Probabilidad posterior de miembro en cultivo (ACP)	81
Anexo 10. Numero de observaciones y porcentaje clasificado en cultivo	83
Anexo 11. Formato para medición de textura en laboratorio	84
Anexo 12. Formato para determinación de densidad real	85
Anexo 13. Formato para determinación de densidad aparente	86
Anexo 14. Formato para determinar límite líquido	87
Anexo 15. Formato para determinar límite plástico	88

## Introducción

El estudio de las propiedades físicas del suelo, tiene un papel importante en la caracterización de su productividad. En particular, la compactación afecta, tanto en forma directa como indirecta, algunas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire, poblaciones de organismos y los procesos de oxidación reducción (Henríquez, y otros, 2011); además, se presenta gran resistencia a la penetración de las raíces, aumentando la tasa de difusión de los nutrientes, por la unión entre las partículas (Aruani, 2004).

El incremento de la resistencia a la penetración de raíces, hasta valores indicados como limitantes físicos, conllevaría a producir formas más redondeadas y tamaños irregulares de la raíz reservante, que afecta la calidad postcosecha del cultivo (Pérez, García, Paredes, & Luna, 2016).

La permanencia de la compactación en el suelo, se considera principalmente grave y se le relaciona a una serie de efectos adversos, como la reducción en un 10%, del rendimiento de los cultivos (Duiker S. W., 2002); el incremento en los costos de producción, mayor vulnerabilidad de los cultivos a las enfermedades, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la mala aireación del suelo, la disminución de la productividad del suelo, y de la infiltración del agua, por lo que se incrementa la escorrentía y el riesgo de erosión (Palacio, 2017).

Entre estas propiedades físicas de los suelos que pueden incidir en el crecimiento de la enfermedad Pudrición del cogollo PC (*Phytophthora palmivora*) en palma de aceite, están la textura, la compactación, la baja porosidad y la baja conductividad eléctrica; estas propiedades pueden beneficiar el avance de la enfermedad, debido a que muchos cultivos de palma de aceite se han establecido en suelos que presentan estas limitaciones (Fernández, 2021).



La compactación edáfica, no sólo afecta el crecimiento de las plantas, también afecta la emergencia de estas y la captación de nutrientes (Gabriel Zerpa, 2013), porque perjudica el desarrollo radical y la dinámica hídrica en el perfil, al aumentar la resistencia del suelo a ser penetrado por las raíces, y en la capa superficial ocasiona cambios físicos y pedogenéticos (Holguín & Will, 2011).

El mayor contenido de materia orgánica y actividad biológica en la labranza cero, hace que el suelo sea más resistente a la compactación (Duiker S. , 2007), en ausencia de labranza, la distribución radical es más superficial aún para portainjertos vigorosos, y la cantidad de raíces será mayor donde se encuentre la capa más fértil (Aruani, 2004). EL objetivo de este trabajo, fue evaluar la resistencia del suelo a la penetración en diferentes sistemas de producción agrícola, como arroz (*Oryza sativa*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), cacao (*Theobroma cacao*) y café (*Coffea arabica*) de Norte de Santander.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

Evaluación de la resistencia del suelo a la penetración de las raíces en diferentes sistemas de producción agrícola.

### **1.2 Planteamiento del problema**

Las propiedades físicas de los suelos, son características que un agricultor puede observar; estas propiedades se ven afectadas por el cómo se usan los suelos para el crecimiento de las plantas o para otras actividades (Cruz, 2007).

Debido a que hoy en día sólo se evalúan las propiedades químicas, al momento de establecer un cultivo, surgió la necesidad de evaluar también propiedades físicas, como la textura, densidad aparente y densidad real, la humedad, los límites de consistencia y resistencia a la penetración de las raíces al suelo, ya que estas propiedades son fundamentales para el desarrollo óptimo de los cultivos, así como lo manifiesta Martines (2017), que un suelo equilibrado, de calidad y sano, se expresa en plantas sanas.

De acuerdo con Singer (2000), las características físicas del suelo son consideradas una parte importante en la evaluación de la calidad de este recurso, debido a que estas no se pueden mejorar fácilmente.

La compactación en los suelos agrícolas, es un problema que implica la utilización de energía en las labores, alto consumo de recursos y la degradación del suelo, esto hace que se pierdan sus propiedades y así mismo, se obtengan bajas tasas de rendimiento en la producción (Molina, Zapata, & Magaña, 2013).

### **1.3 Formulación del problema**

¿El crecimiento de la raíz de las plantas, la absorción de agua y nutrientes, se ven afectadas positiva o negativamente, por las características físicas de los suelos evaluados (compactación)?

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar algunas características físicas de los suelos (resistencia del suelo a la penetración de las raíces) en diferentes sistemas de producción agrícola de Norte de Santander.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Determinar las propiedades físicas como textura, densidad aparente, densidad real, resistencia a la penetración, límites y humedad del suelo, presentes en 10 cultivos de arroz, palma de aceite, cacao y café.

Identificar cuáles propiedades son limitantes para la producción, en los diferentes sistemas de producción.

### **1.5 Justificación**

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida la capacidad de uso del suelo y la utilización por parte del hombre. La condición física de un suelo, determina la facilidad para la penetración de las raíces, la retención de nutrientes, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la porosidad, la plasticidad, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, etc. Se considera necesario que las personas implicadas en el uso y manejo del suelo, conozcan las propiedades físicas de éste, para saber en qué medida y cómo intervienen en el crecimiento de las

plantas, cómo la actividad humana puede llegar a transformarlas, además, entender la importancia de conservar las mejores condiciones físicas del suelo (Rucks, García, Kaplán, & Hill, 2004).

La fertilidad es indispensable para que un suelo sea productivo, no obstante, un suelo fértil no necesariamente es productivo, ya que existen otros factores de tipo físico, como la escasa profundidad, la roca superficial, el mal drenaje y el déficit de humedad, etc., que pueden reducir la producción, aun cuando la fertilidad del suelo sea adecuada (Molina E. , Sf).

Los análisis físicos del suelo, permiten evaluar otros factores de la fertilidad del suelo, como los regímenes de aire y agua. Estos datos y otra información adicional, proporcionan medidas de manejo del suelo (Schlatter & Gerding., 2003). De esta manera, se requiere que el manejo de los suelos pueda desarrollar y mantener suelos saludables (Orjuela, 2016). Debido a que hoy en día, hay poca información científica sobre el estudio de las propiedades físicas de los suelos y la resistencia del suelo a la penetración de las raíces en diferentes sistemas productivos, a nivel nacional y principalmente local, este estudio servirá de ayuda para la realización de posteriores investigaciones.

## **1.6 Alcances y limitaciones**

### ***1.6.1 Alcances.***

Conocer las condiciones físicas que poseen los suelos de los diferentes sistemas de producción, para diagnosticar a qué estrés pueden estar sometidos los cultivos, información que juega un papel importante para el desarrollo y rendimiento de las plantaciones agrícolas. Además, conocer mejor los parámetros agrícolas como labranza, la fertilización, la disponibilidad de nutrientes, el drenaje y el manejo adecuado de los residuos de las cosechas (Urriola, 2020).

## ***1.6.2 Limitaciones.***

Durante el desarrollo de la investigación se presentaron las siguientes limitaciones:

**1.6.2.1 Limitaciones ambientales.** Afectaciones por fenómenos climáticos adversos, tales como fenómeno de la niña.

**1.6.2.2 Limitaciones administrativas.** Ausencia de información científica respecto al tema, a nivel nacional y local, que permitiera contrarrestar los resultados.

## **1.7 Delimitaciones**

### ***1.7.1 Delimitación Espacial.***

La evaluación experimental, se realizó en el Laboratorio de Suelos Agrícolas, sede Campos Elíseos de la Universidad Francisco de Paula Santander. Las muestras fueron tomadas de diferentes sistemas de producción, ubicados en los municipios de Cúcuta, Tibú, Bucarasica y Sardinata, Departamento Norte de Santander.

### ***1.7.2 Delimitación Temporal.***

El proyecto en cuestión, se desarrolló dentro de una delimitación temporal de seis (6) meses, a partir de la toma de muestras en campo.

### ***1.7.3 Delimitación Conceptual.***

El proyecto se enmarcó en conceptos tales como: densidad aparente, densidad real, textura, resistencia a la penetración, humedad del suelo y límites de consistencia.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Antecedentes

La caracterización física de los suelos, se ha realizado en numerosos estudios tanto a nivel internacional como nacional, destacándose el estudio físico de los suelos para una gran cantidad de aplicaciones a la agricultura, enfocadas a determinar el uso potencial de los suelos (Carrascal, 2017), como es el caso de Belisario Volverás Mambuscay (2016), quien determinó que las características físicas que más se afectan por las acciones de uso del suelo, son las relacionadas con los cambios en la estructura, que disminuyen la respuesta de suelos y cultivos a la aplicación de enmiendas y fertilizantes, así como la capacidad del suelo para aceptar, retener y ceder agua a los cultivos; de igual manera, Amézquita (2004), se refiere a la oferta edafológica que el suelo debe brindar a las raíces de las plantas, en relación a las condiciones necesarias para que ellas crezcan abundante y rápidamente dentro de él, y extraer el agua y los nutrientes, para que los cultivos puedan expresar su máxima capacidad genética productiva.

Oviedo, *et al* (2012), evaluó el efecto de la aplicación de los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo de Cali, sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar, principalmente las que están relacionadas con la macroporosidad del suelo, como densidad aparente, estabilidad de agregados y porosidad total, demostrando que los cambios físicos fueron atribuidos a factores externos como el clima y otras características del suelo, a través del tiempo. Así como Fernández (2021), quien realizó una caracterización físico- química de los suelos, contenido de nutrientes foliares y su relación con la incidencia de la pudrición de cogollo en palma africana, determinó que principalmente esta enfermedad está asociada al deterioro de las propiedades físicas dentro de la zona de plateo. Para

el año 2011, Henríquez y otros, determinaron la resistencia a la penetración, al corte tangencial, la densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas (Costa Rica), por lo cual su determinación rápida y de otras propiedades del suelo, puede facilitar la evaluación de la productividad de los suelos y su posible impacto a nivel ambiental.

Rincón *et al.*, (2008), evaluaron las propiedades físicas de los suelos sulfatados ácidos (SSA) del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, con el fin de determinar sus limitantes de tipo físico, su relación con las propiedades químicas y, con base en su identificación, establecer el tipo de manejo adecuado en riego, drenaje y labranza.

### ***2.1.1 Antecedentes Bibliográficos***

Lancheros (*et al* 2012), realizó un estudio, con el objetivo de establecer el comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en un Andisol, con diferentes usos y ocupaciones. Las variables analizadas fueron, resistencia a la penetración, humedad gravimétrica y volumétrica, densidades aparente y real, contenidos de arena, limo y arcilla, conductividad hidráulica saturada, porosidad total, agua disponible, macroporosidad y microporosidad. Se pudo evidenciar, algunas relaciones inversas entre los valores de resistencia a la penetración y los contenidos de humedad gravimétrica, contenido de arcillas y conductividad hidráulica saturada, macro y microporosidad; también se observó la predominancia de la microporosidad en el espacio poroso, lo cual sería una consecuencia de los altos contenidos de arcilla presentados en los dos lotes de estudio. De igual manera, Demuner & Magaña *et al* (2013), evaluaron la resistencia a la penetración de un suelo franco arcilloso al final de dos años de manejo, utilizando labranza convencional, labranza vertical, y labranza cero, demostrando que los sistemas de labranza no muestran cambios con respecto a la fuerza aplicada al suelo para su fallo, ya que esta acción está íntegramente relacionada con la densidad aparente y la humedad del suelo.

Quintero *et al* (2013), estudió la importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos, ya que es necesario evaluar y monitorear dicha calidad, con el objetivo de mejorar o conservar la fertilidad y la productividad del suelo, garantizando la sustentabilidad de los agroecosistemas.

Collazos *et al* (2015), evaluaron la influencia de la intensidad de uso sobre algunas propiedades físicas, como conductividad hidráulica, permeabilidad al aire, porosidad total, porosidad drenable, compactibilidad, porosidad residual, materia orgánica y resistencia mecánica a la penetración.

## **2.2 Marco teórico**

La resistencia a la penetración, es un indicador del nivel de compactación de un suelo. La compactación restringe el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua que disponen las raíces. Una forma de medir la resistencia a la penetración, es calcular la resistencia del suelo al movimiento de un cono de penetración, y dividirla entre la profundidad de penetración. Los penetrómetros pueden ser estáticos o dinámicos. Los penetrómetros estáticos miden la fuerza empleada para empujar una sonda en el suelo a una velocidad constante, en tanto que los penetrómetros dinámicos miden la resistencia a la penetración, al golpear la sonda repetidamente en el suelo. Cabe señalar que todos los penetrómetros son sensibles a las diferencias que existen en la textura del suelo, la humedad y densidad aparente, razón por la cual se aconseja medir también estas propiedades, al usar un penetrómetro (CIMMYT, 2013).

Según Ibáñez (2006), la profundidad máxima de las raíces es: Especies Arbóreas:  $7.0 \pm 1.2$  m; Especies de Matorral:  $5.1 \pm 0.8$  m; Especies Herbáceas:  $2.6 \pm 0.1$  m, Especies de cultivo:  $2.1 \pm 0.2$  m; Esto indica, su capacidad para captar agua. Tal búsqueda se relaciona con la escasez del líquido



elemento en superficie. Lo mismo se podría decir, respecto a los nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas.

### ***2.2.1 Ley de la Relatividad.***

El trabajo de Einstein sobre la relatividad, comprende dos partes: una “teoría especial” y una “teoría general”. La teoría especial, se refiere a los movimientos de observadores y acontecimientos que no sufren ninguna aceleración. Las velocidades permanecen uniformes. La teoría general, por otro lado, incluye las aceleraciones (López, 2017).

La creación de la teoría de la relatividad especial de Einstein, comenzó con consideraciones estéticas que le llevaron a formular dos principios fundamentales sobre la naturaleza. Una vez formulados estos dos principios, Einstein simplemente siguió la lógica que se derivaba de estos dos principios, hasta donde fuera que le llevase. Como resultado, Einstein derivó de ellos una nueva teoría de los conceptos de espacio, tiempo y masa, conceptos que están en la base de toda la física. Démonos cuenta, que Einstein no estaba construyendo una nueva teoría para acomodar datos experimentales nuevos y desconcertantes, sino que derivaba, por deducción, las consecuencias que, sobre los fundamentos de todas las teorías físicas, tenían sus principios básicos (López, 2017).

Pero ¿qué es el movimiento relativo? Una forma de analizar el movimiento de un objeto, es determinar su velocidad promedio, que se define como la distancia recorrida durante un tiempo dado (López, 2017).

### ***2.2.2 Densidad aparente.***

Se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g. cm<sup>-3</sup> o t. m<sup>3</sup> ). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. Es una forma de evaluar la resistencia del suelo a la elongación de las raíces. También se usa para convertir datos expresados en concentraciones a masa o volumen, cálculos muy utilizados en fertilidad y fertilización de cultivos extensivos. La densidad aparente, varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica; puede variar estacionalmente por efecto de labranzas y con la humedad del suelo, sobre todo en los suelos con arcillas expandentes (Rojas, 2012). Valores de Da 1.0 g/cm<sup>3</sup> y 1.8g/cm<sup>3</sup>.

### ***2.2.3 Densidad real.***

Se refiere al peso del material sólido que compone el suelo. Constituye la masa (peso) de una unidad de volumen de partículas sólidas del suelo. Esta se expresa en g/ml, y presenta una considerable variación, aunque la densidad de partículas en suelos es casi constante y varía de 2.60 a 2.75 g/ml, excepto en suelos orgánicos. La densidad real de un suelo, depende principalmente de la composición y cantidad de minerales y de la proporción de materia orgánica e inorgánica que contiene (Fragoso, Abreu, & Molina, 2015).

### ***2.2.4 Humedad.***

La cantidad total de agua disponible para absorción de la planta, que es la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y a menudo se expresa como un porcentaje en volumen (volumen de agua/ volumen de muestra de suelo) (Zotarelli & Morgan, 2013).

### ***2.2.5 Límite de consistencia líquido.***

Se define como el porcentaje de humedad del suelo, por debajo del cual se presenta un comportamiento plástico. Cuando los suelos alcanzan porcentajes de humedad mayores al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso. Este límite, además de ser un parámetro esencial para la clasificación de los suelos, puede ser útil para determinar problemas de potencial de volumen, para estimar asentamientos en problemas de consolidación y en conjunto con el límite plástico, para predecir la máxima densidad en estudios de compactación (CONDE, 2018).

### ***2.2.6 Penetrómetro.***

Es una herramienta con la cual se prueba el nivel de compactación y labrado de su suelo. El Penetrómetro mide la resistencia del suelo, que da una indicación de qué tan compactado está el suelo. Cuanto menor sea el valor, más oxígeno disponible para la vida microbiana del suelo y más facilidad tienen las raíces de las plantas, los nutrientes y el agua, para penetrar a través del suelo (LAPACA, 2022).

### ***2.2.7 Suelo.***

Definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales minerales meteorizados, materia orgánica, aire, agua y organismos. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo, difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2022).

### 2.2.8 Resistencia a la penetración.

Este es un componente importante del síndrome de degradación de la tierra, que es un problema para la gestión del suelo en todo el mundo. Es un fenómeno de larga data, no sólo asociado con la agricultura, sino también con la explotación forestal, el uso recreativo de la tierra, la instalación de tuberías, la restauración de la tierra y el pisoteo de la vida silvestre (Batey, 2009).

### 2.2.9 Textura.

Es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la tierra fina, en el suelo; estas partículas, llamadas separados, se agrupan en tres clases, por tamaños: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar) y son definidas como se muestra en la Tabla 1, según varias instituciones internacionales (Jaramillo, 2002).

**Tabla 1.** Definición de los separados del suelo.

SEPARADO	RANGO DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA ( mm )		
	USDA	ISSS*	DIN y BSI**
ARENA	2 - 0.05	2 - 0.02	2 - 0.08
LIMO	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002	0.08 - 0.002
ARCILLA	< 0.002	< 0.002	< 0.002

Fuente: Jaramillo (2002)

### 2.2.10 Tetra kit o medidor de humedad.

Consiste en una herramienta para medir la humedad del suelo, en el que se clavan dos picas en las capas superficiales del sustrato, y en cuestión de segundos aparece una serie de datos en la pantalla muy interesantes, como: Temperatura del suelo, Conductividad eléctrica, Humedad (en %) (Angulo, 2020).

### ***2.2.11 Torcómetro.***

Permite evaluar con cierta aproximación, la resistencia al esfuerzo cortante no drenado de los suelos saturados; a esta resistencia se denomina cohesión (Hermosillo, 2013).

## **2.3 Marco conceptual**

### ***2.3.1 Agricultura sustentable.***

Es aquella que debe garantizar la seguridad alimentaria mundial y al mismo tiempo, promover ecosistemas saludables y apoyar la gestión sostenible de la tierra, el agua y los recursos naturales (FAO O. d., 2022).

### ***2.3.2 Conservación de suelos.***

Se define como, las actividades a nivel local, que mantienen o aumentan la capacidad productiva de la tierra en áreas afectadas por o propensas a la degradación. Incluye la prevención o la reducción de la erosión del suelo, la consolidación y la salinidad; la conservación o drenaje del suelo; el mantenimiento o mejoramiento de la fertilidad del suelo (FAO O. d., 2022).

### ***2.3.3 Degradación de los suelos.***

Se define como un cambio en la salud del suelo, resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo, en cuestión en su ecosistema (FAO P. d., 2022).

### ***2.3.4 Fertilidad del suelo.***

La fertilidad del suelo, es la capacidad que tiene el terreno para sustentar el crecimiento de las plantas y optimizar el rendimiento de los cultivos. Ello puede potenciarse por medio de fertilizantes orgánicos e inorgánicos que nutran el suelo (IAEA, 2022).

## **2.4 Marco contextual**

### ***2.4.1 Delimitación y características geográficas de Norte de Santander***

Con relación a Colombia, el departamento de Norte de Santander está situado al Noreste, entre las cuencas del lago Maracaibo y del río Magdalena; atravesado por la Cordillera Oriental, sobresaliendo en ella el macizo del Santander al Sur, la Serranía de los Motilones al Occidente y el Nudo de Santurbán- Mérida al oriente.

Astronómicamente, está ubicado entre los paralelos  $06^{\circ}56'42''$  y  $09^{\circ}18'01''$  de latitud norte y los meridianos  $72^{\circ}01'13''$  y  $73^{\circ}38'25''$  de longitud oeste, con respecto al meridiano de Greenwich.

El departamento tiene una extensión de  $22.367 \text{ km}^2$ , que equivalen al 1.96% de la superficie total del país ( $1.141.784 \text{ km}^2$ ) y al 8.43% de la región Andina ( $265.414 \text{ km}^2$ ). Limita por el norte y el oriente con la República Bolivariana de Venezuela, por el sur con los departamentos de Boyacá y Santander, y por el occidente, con los departamentos de Cesar y Santander.

### ***2.4.2 Demografía y población***

De acuerdo con el censo de población de 2020, el departamento Norte de Santander tenía 1,642.746 habitantes (DANE, 2022), distribuidos el 47% en la capital (Área metropolitana de Cúcuta), el 21% en Ocaña, Pamplona y Tibú, y el 32% entre los 36 municipios restantes (DANE, 2020).

Cabeceras municipales como las de Durania, Lourdes, Mutiscua, Pamplonita, San Cayetano, Santiago y Villacaro, registran una población inferior a 29.000 habitantes, siendo entre estas la más baja, la que registra Santiago, con 2.823 habitantes. La población rural (30%) se localiza preferentemente a orillas de las vías y alrededores de los principales centros urbanos, por los servicios que estos pueden proporcionar. Las condiciones difíciles del medio natural y la ausencia de una infraestructura básica de comunicaciones, explican que las zonas de colonización septentrional (cuenca del Catatumbo) y meridional del Departamento, presenten vacíos poblacionales.

La población económicamente activa en Norte de Santander, presenta 57.1% del total de la población, correspondiéndole el 48.9% ocupados y el 8.2% desempleado para el 2021 (Elejalde, 2022). La desocupación se viene acentuando desde 1983, por la crisis económica fronteriza con la República Bolivariana de Venezuela, debido a la devaluación del Bolívar.

La mayor parte de la población económicamente activa, se concentra en las cabeceras municipales, por ser estas las que ofrecen aparentemente las mayores posibilidades de empleo, constituyéndose en focos de atracción para la población de otros lugares.

Por sectores económicos, la población ocupada a nivel departamental es más significativa en el sector primario, con la agricultura como la rama de actividad más importante. Los cultivos más representativos son de café, palma de aceite, arroz, caña de azúcar, papa, tabaco, sorgo, plátano, cacao y frijol. La ganadería vacuna y caprina también es una fuente de ingresos; el segundo lugar lo ocupa el sector industrial, de escaso desarrollo en el departamento, concentrado básicamente en la capital; se soporta en la producción de alimentos y bebidas, productos químicos, cemento y calzado. La minería se concentra en la explotación petrolera en la región del Catatumbo y en el valle del río Zulia (DANE, 2018). Las personas que laboran en actividades no especificadas, generalmente referidas al subempleo, se concentran básicamente en la capital y en los centros urbanos principalmente (Cúcuta, Ocaña, Pamplona, Villa del Rosario). Le sigue en importancia el sector terciario (servicios), donde se destacan las actividades relacionadas con el comercio y servicios personales, bancarios y de transportes, que dependen de la actividad fronteriza.

### ***2.4.3 Economía***

La dinámica económica medida a través del Producto Interno Bruto (PIB), indica que la participación del Departamento en la economía del país es del 1.5 %, y 7.5 de la región (DANE, 2021). Su capital, la ciudad de Cúcuta, cuenta con una población perteneciente a variedad de etnias indígenas, Room, Afrodescendientes, y Palenqueros, dada su ubicación fronteriza, que ha generado en cruce cultural interesante, entre lo que fluctúa y lo que permanece históricamente (DANE, 2020).

Dentro del sector primario, el subsector agrícola tiene un área cultivada de 171.672 hectáreas (MINAGRICULTURA, 2017), predominando a la agricultura campesina en un 90%,



con uso intensivo de mano de obra familiar, baja productividad, estrechos márgenes en la generación de exelentes, tamaño reducido y sin uso de la tecnología moderna.

Del total de las exportaciones en Norte de Santander entre el año 2012 y 2021 representaron el 0,7 % de las exportaciones nacionales, y para el año 2022, las exportaciones agropecuarias representaron el 0.7 %. Los productos minero- energéticos aportan el 92,7% y los productos no minero-energéticos, el 7.3 % del producto interno bruto del departamento (DANE, 2022).

## **2.5 Marco legal**

Constitución Política de Colombia de 1991. Definición del Estado social de Derecho y establecimiento de varios artículos tendientes a velar por la protección del ambiente y las personas.

Artículo 27. El Estado garantiza las libertades de enseñanza, aprendizaje, investigación y cátedra.

Artículo 67. La educación es un derecho de la persona y un servicio público que tiene una función social; con ella se busca el acceso al conocimiento, a la ciencia, a la técnica, y a los demás bienes y valores de la cultura (...).

Artículo 71. La búsqueda del conocimiento y la expresión artística son libres. Los planes de desarrollo económico y social incluirán el fomento a las ciencias y, en general, a la cultura. El Estado creará incentivos para personas e instituciones que desarrollen y fomenten la ciencia y la tecnología y las demás manifestaciones culturales y ofrecerá estímulos especiales a personas e instituciones que ejerzan estas actividades.

Ley 2 de 1959. Establecimiento de zonas forestales protectoras y bosques de interés general, para el desarrollo de la economía forestal y la protección de los suelos.

Ley 23 de 1973. Establecimiento de lineamientos para prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, con el fin de mejorar la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio Nacional.

Decreto 2811 de 1974. Código de los recursos naturales. Estableció la importancia de la conservación de los ecosistemas naturales y el suelo, así como el establecimiento de requisitos y condiciones para la importación, fabricación, transporte, comercialización, manejo y disposición de sustancias peligrosas.

Ley 9 de 1979. Código sanitario nacional. Desarrolla múltiples temas entre los cuáles se destacan los residuos sólidos, emisiones atmosféricas, sustancias químicas peligrosas, sustancias tóxicas, plaguicidas, etc.

Decreto 2655 de 1988. Código de minas. Establece algunas restricciones de la actividad minera sobre todo en zonas de reserva natural, asentamientos humanos y zonas de producción hídrica; con el fin de prevenir los riesgos a la salud y la contaminación de los suelos y el agua.

Decreto 1843 de 1991. Reglamenta el uso y adecuado manejo de plaguicidas a nivel nacional, incluyendo aproximaciones sobre parámetros técnicos y niveles de toxicidad.

Ley 99 de 1993. (Sistema Nacional Ambiental). Se establecen regulaciones ambientales en torno a actividades agropecuarias como el uso de agroquímicos, especialmente lo referente a la importación, distribución, producción y comercialización de pesticidas, acogiéndose a convenios internacionales, como la decisión andina 436 del acuerdo de Cartagena y sus normas reglamentarias.

Ley 388 de 1997. Particulariza la restricción al uso del suelo respecto de la urbanización, dentro de los Planes de Ordenamiento territorial (POT), y precisa que las zonas de expansión urbana o rural pueden tener una limitación por aspectos paisajísticos, geográficos o ambientales.

### 3. Diseño metodológico

#### 3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se aplicó en este estudio fue experimental, ya que se realizó en laboratorio y en campo, en la cual se comprobó una hipótesis ya existente, con el fin de generar una discusión que permitió determinar el estado del suelo y de esta manera, emplearlo como referencia para el manejo de los sistemas de producción en el Departamento Norte de Santander.

#### 3.2 Población y muestra

##### 3.2.1 Población

Para el desarrollo de este estudio, se seleccionaron 10 sistemas de producción, como arroz (*Oryza sativa*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), cacao (*Theobroma cacao*), y café (*Coffea arabica*), ubicados en los municipios de Cúcuta, con un área de 1.117 km<sup>2</sup>; Tibú, que comprende un área de 2.737 km<sup>2</sup>; Bucarasica con un área de 267 km<sup>2</sup> y, Sardinata, que cuenta con un área de 1.451 km<sup>2</sup> respectivamente, para un total de 5.572 km<sup>2</sup>.

##### 3.2.2 Muestra

De la población total, se colectó una muestra de suelo por cada finca seleccionada, teniendo en cuenta que son 10 muestras por cultivo (arroz, palma, cacao, y café), en los municipios seleccionados.

#### 3.3 Hipótesis

Ho: Las propiedades físicas de los suelos para los diferentes sistemas de producción, permiten una óptima penetración de las raíces al suelo.

Ha: Las propiedades físicas de los suelos para los diferentes sistemas de producción, no permiten una óptima penetración de las raíces al suelo.

### **3.4 Variables dependientes**

Determinación de la resistencia a la penetración.

Determinación de la humedad.

Determinación de la densidad aparente por el método del terrón parafinado.

Determinación de la densidad real por el método del picnómetro.

Determinación de los límites de consistencia.

Determinación de la textura por el método del Hidrómetro de Bouyoucos.

### **3.5 Fases de la investigación**

#### ***3.5.1 Toma de muestras***

Se procedió a limpiar la superficie del sitio donde se colectó la muestra; se utilizó una pala y se excavó un pequeño hoyo en forma de V, a una profundidad de 20 cm. Con un cuchillo se eliminaron los bordes en la misma pala, de manera que la sección central seleccionada fuera de 3 a 5 cm de ancho. Las muestras colectadas de 2 kg, se colocaron en doble funda plástica ( ver figura 1a), para evitar pérdida de la misma y entre las fundas se colocó una tarjeta de identificación (ver figura 1b), donde se mencionan: nombre del propietario de la finca, ubicación geográfica, coordenadas x y, nombre del lote (Avilés, 2018). Las muestras obtenidas fueron llevadas al laboratorio, para realizar el análisis físico y determinar la textura, Da, Dr., humedad y límites de consistencia.

**Figura 1.** Toma de muestras. a. Recolección de la muestra en doble funda plástica. b. Tarjeta de identificación



### 3.5.2 Determinación de la resistencia a la penetración

Para determinar la resistencia a la penetración del suelo, se utilizó un penetrómetro; se seleccionó el área de trabajo sin disturbarla, evitando las grietas y espacios aéreos de cualquier naturaleza; se colocó el dial en cero y se aplicó manualmente una presión constante, hasta cuando el cono entrase con el suelo ( ver figura 2). Por último, se tomaron las lecturas que marcó el dial (IGAC, 2006).

**Figura 2.** Determinación de la resistencia a la penetración



### 3.5.3 Determinación de la humedad volumétrica

Para determinar la humedad volumétrica, se utilizó el tetra kit, el cual, previamente calibrado, se introdujo en el suelo a la profundidad de 10 cm, para determinar el contenido del agua; seguidamente se encendió, y mostró el valor en la pantalla del equipo lector ( ver figura 3), que fue directamente el contenido de agua del suelo expresado en porcentaje de volumen ocupado (IGAC, 2006).

**Figura 3.** Determinación de humedad volumétrica



### 3.5.4 Determinación de la densidad aparente $D_a$ . (método del terrón parafinado)

Para determinar la  $D_a$ , se utilizó un terrón de suelo, el cual se pesó previamente y se registró el dato (ver figura 4a); este se ató a un hilo y se sumergió por unos segundos en el recipiente metálico que contiene la parafina líquida (60 °C), hasta cubrirlo totalmente (ver figura 4b); posteriormente se extrajo y se dejó enfriar. Luego se pesó el terrón con parafina y se registraron los datos; finalmente, se sumergió el terrón en una probeta que contenía agua y se midió el volumen desalojado por el terrón, cuando se sumergió en la probeta (IGAC, 2006).

$$\text{Cálculos: } \textit{densidad} = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}}$$

**Figura 4.** Determinación de la densidad aparente  $D_a$ . a. Peso del terrón sin parafina. b. Terrón sumergido en parafina



### 3.5.5 Determinación de la densidad real $D_r$ . (método del picnómetro).

Para la determinación de la  $D_r$ , se pesó un picnómetro limpio y seco con la tapa (ver figura 5a); se introdujeron 10 g de suelo seco al aire y tamizado por 2mm, se limpiaron las partículas de suelo que se habían quedado adheridas al cuello del picnómetro, se pesó el picnómetro con el suelo y la tapa (ver figura 5b), se adicionó agua hasta llenar completamente el picnómetro, se colocó la tapa, y se secó la parte exterior del picnómetro. Se pesó el picnómetro con el suelo y el agua (ver figura 5c), se adicionó agua destilada y se pesó (IGAC, 2006) (ver figura 5d).

Para la determinación de la  $D_r$ ., se utilizó la siguiente fórmula.

$$D_r = \frac{(W_s - W_a)}{(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)}$$

En donde:

$D_r$ . = Densidad de partículas o densidad real.



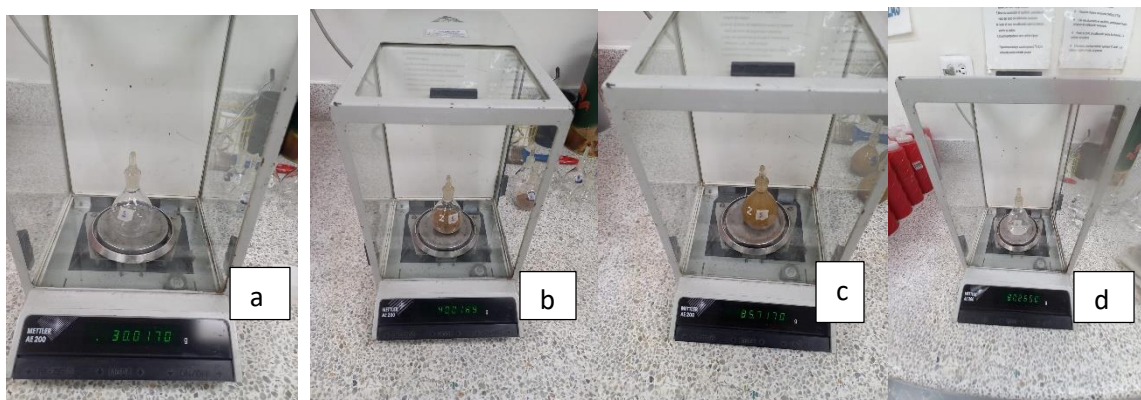
$W_s$  = Peso del picnómetro más el suelo.

$W_a$  = Peso del picnómetro vacío.

$W_{sw}$  = Peso del picnómetro lleno con suelo y agua (conjunto).

$W_w$  = peso del picnómetro lleno con agua.

**Figura 5.** Determinación de la densidad real  $D_r$ . a. Peso del picnómetro vacío con tapa. b. Peso picnómetro con tapa más muestra. c. peso picnómetro con tapa más muestra más agua. d. Peso picnómetro con tapa más agua.



### 3.5.6 Determinación de la textura (método de Bouyoucos).

Para determinar la textura, se depositaron en el vaso de la batidora eléctrica, 50 gramos de suelo seco y tamizado (2mm) (ver figura 6a), se añadió agua destilada hasta 7 centímetros por debajo del borde del vaso, luego se agregaron 10 ml de Hexametáfosfato de sodio como agente dispersante, se ajustó el vaso a la batidora y se dejó dispersar por 15 minutos (ver figura 6b). Seguidamente, se trasladó la suspensión del vaso de la batidora al cilindro graduado, teniendo cuidado de no perder el material en el proceso y se añadió agua destilada hasta 800 ml (ver figura 6c); se introdujo suavemente el hidrómetro y luego se completó con agua hasta 1000 ml, se retiró el hidrómetro, y con un tapón de caucho N° 12, se tapó la boca del cilindro y se agitó ligeramente durante 1 minuto, invirtiendo el cilindro varias veces; se colocó el hidrómetro cuidadosamente

dentro de la suspensión y se leyó a los 40 segundos de haber iniciado el conteo del tiempo. Se registró la lectura y se removió cuidadosamente el hidrómetro. Se tomó la temperatura de la suspensión. Dos horas después de colocar el cilindro en la mesa, se introdujo cuidadosamente de nuevo el hidrómetro y se registró la lectura. Se extrajo el hidrómetro, se tomó y registró la temperatura. El hidrómetro está calibrado a 19.44C. Por consiguiente, se aplicó una corrección por temperatura a la lectura del hidrómetro de 0.2 por cada 0.5 C (IGAC, 2006).

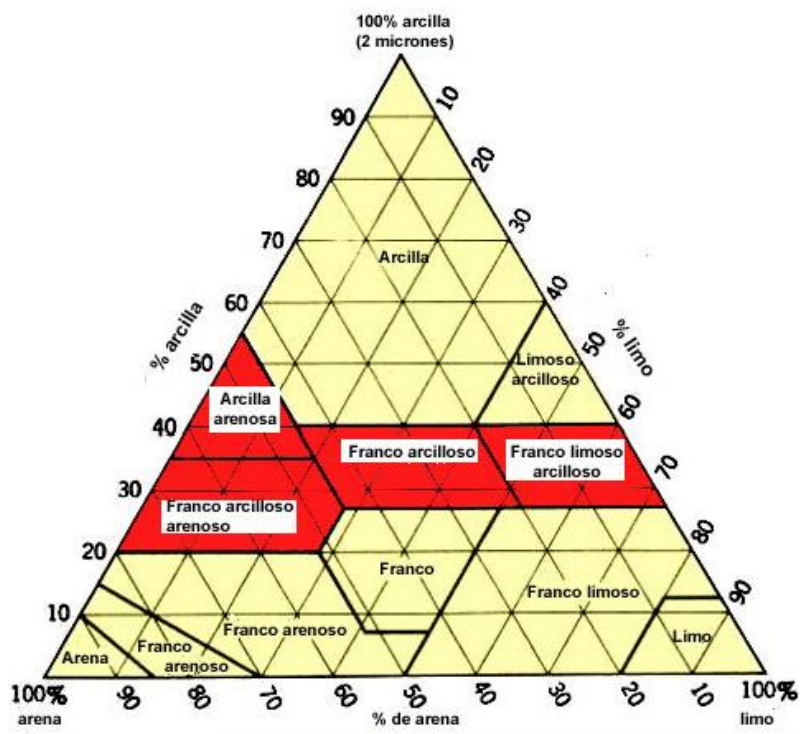
$$\text{Cálculos: } \% \text{ de fracción de Arena} = 100 - \left( \frac{\text{Lectura hidrómetro corregida a los 40 seg} \times 100}{\text{peso muestra suelo}} \right)$$

$$\% \text{ de fracción de Arcilla} = \frac{\text{Lectura hidrometro corregida a las 2 horas} \times 100}{\text{peso muestra suelo}}$$

$$\% \text{ de fracción de Limo} = 100 - (\% \text{ fracción Arena} + \% \text{ Fracción Arcilla})$$

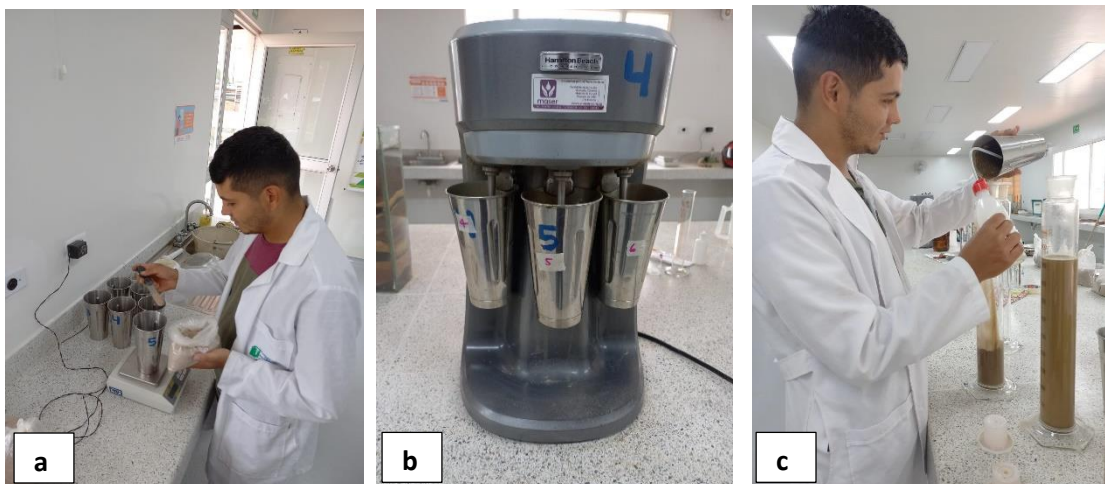
Con los resultados anteriores, se calculó en el triángulo textural (ver figura 7), la granulometría de los suelos.

**Figura 6.** Triángulo textural.



Fuente: IGAC, (2006)

**Figura 7.** Determinación de la textura. a. Peso de la muestra en el vaso de la batidora. b. Batido de la muestra por 15 minutos. c. traslado de la suspensión del vaso de la batidora al cilindro graduado.



### 3.5.7 Determinación de límites de consistencia (método líquido)

Para la determinación de los límites de consistencia, se pesaron 10 g de suelo seco al aire y tamizado (ver figura 8a). Se depositó la muestra sobre una lámina de acero y se agregaron de 2 a 5 ml de agua destilada, amasándola con la espátula hasta que se homogenice bien y se obtuvo una apariencia cremosa. Se tomó una porción de la pasta de suelo y se colocó por debajo de 1 cm, en una cazuela de casa grande; con ayuda de un ranurador, se dividió la muestra de la cazuela en dos mitades y luego se empezó a golpear la cazuela a razón de 2 golpes por s (ver figura 8b), hasta que las dos partes se unieran (se registró el número de golpes). De la zona donde se unieron las dos mitades, se sacó una tajada de suelo para la cápsula de humedad, que se pesó y se llevó a la estufa a 105°C por 24h (ver figura 8c). Por último, se dejó enfriar, se pesó, se registraron los datos y se calculó el contenido de humedad (IGAC, 2006).

$$\text{Cálculos} \quad LL = \frac{M_{shc} - M_{ssc}}{M_{ssc} - M_c} \times 100$$

Donde :

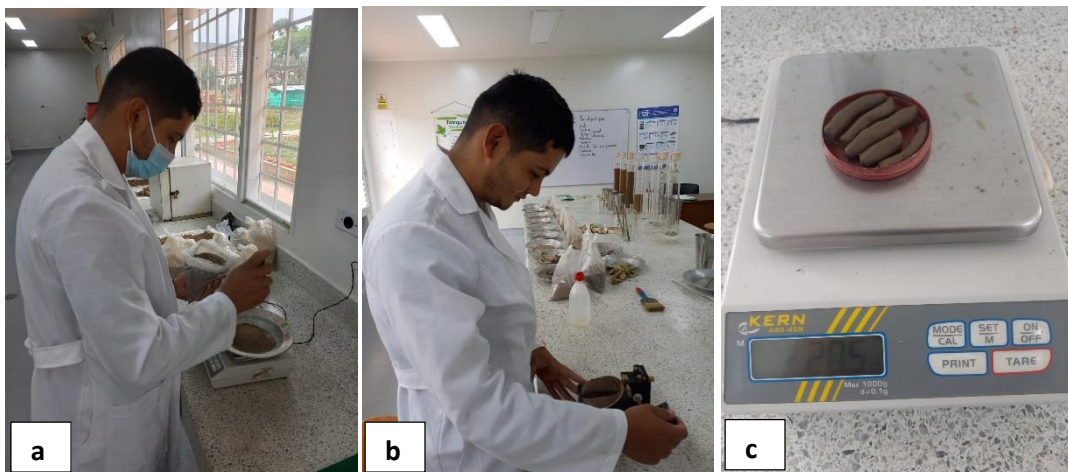
LL= Límite líquido en %

Mshc= Masa de suelo húmedo más cápsula en g.

Mssc= masa de suelo seco más cápsula en g.

MC= masa de la cápsula en g.

**Figura 8.** Determinación de límites de consistencia. a. Peso de la muestra en la lámina de acero. b. Determinación del límite líquido. c. Determinación del límite plástico



### 3.6 Instrumentos para la recolección de información

Para la recolección de información se recurrió a:

Análisis de muestras de suelo. La información se registró en formatos de toma de datos y se llevaron a Excel con sus respectivos gráficos, para luego ser analizados estadísticamente y de esta forma, generar discusión.

Material bibliográfico para el análisis: Revistas científicas y documentos científicos de Internet.

Asesorías: Realizadas por parte del Ingeniero Edgar Alfonso Rodríguez, director del proyecto, Ph.D en Suelos y Aguas, docente de la Universidad Francisco de Paula Santander.

### 3.7 Técnicas de análisis y procesamiento de datos

A los resultados obtenidos, se les realizaron el Análisis de Componentes Principales (ACP), asociado a análisis discriminante, y test de Monte Carlo, el cual permite describir los patrones

globales observados entre los sistemas y verificar la significancia de las diferencias; el análisis de coherencia permitió analizar la covarianza entre tablas de datos de las propiedades físicas de los suelos analizados.

El análisis estadístico, se realizó con la versión de software R 2.13.2 con la librería ade-4.

## 4. Resultados y discusión

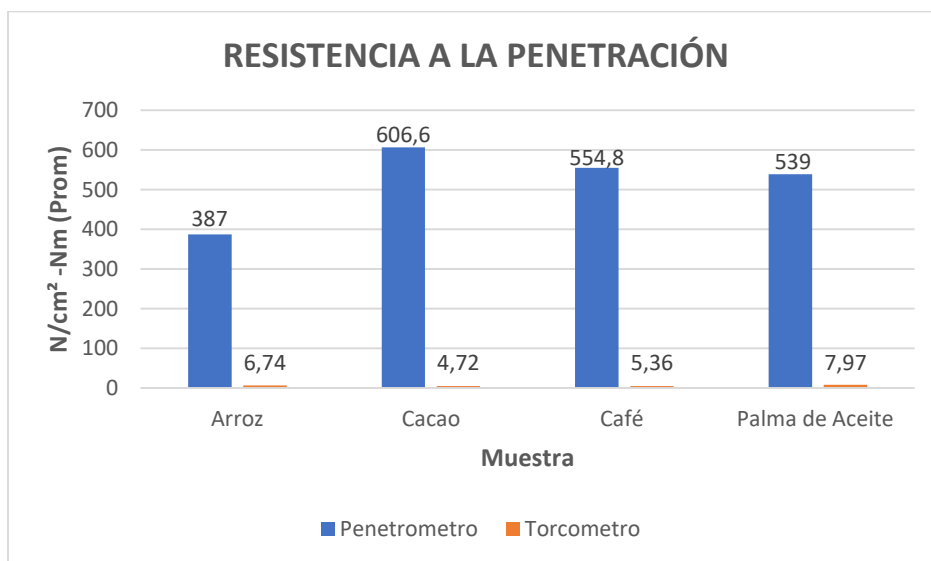
Se tomaron 10 muestras por sistema de producción compuestas por suelo, en los diferentes municipios de N. de S; a cada uno de los lotes se le determinaron la resistencia a la penetración, Da, Dr, humedad, textura y límites de consistencia.

### 4.1 Determinación de la resistencia a la penetración

La evaluación de la resistencia a la penetración, se realizó in situ con un penetrómetro manual (Penetrómetro manual Eijkelkamp. ref. 06.01.SA) a 30 centímetros de profundidad. Los valores obtenidos de presión se expresaron en  $N/cm^2$  (ver anexo 1). Estos valores oscilaron en un rango de 167 y 793 N; esta propiedad es un parámetro de gran importancia, que influye sobre el crecimiento de las raíces y el movimiento del agua y del aire en el perfil del suelo.

El cultivo de cacao presentó, en promedio, mayor resistencia a la penetración con el Penetrómetro, con  $606,6 N/cm^2$  seguida por café con  $554,8 N/cm^2$ , palma de aceite con  $539 N/cm^2$  y arroz con  $387 N/cm^2$ . Para el caso del Torcómetro, el cultivo de palma de aceite presentó mayor compactación con 7,97 Nm, seguida por arroz con 6,74 Nm, café con 5,36 Nm y cacao 4,72Nm (figura 9).

Según Guzmán (2016), en caso de que el suelo se encuentre expuesto a cambios de contenidos de agua, la resistencia a la penetración no se ve tan fuertemente afectada, ya que, para altos contenidos de agua, la resistencia a la penetración es baja. Mientras que Jiménez (2014), evidenció que la resistencia a la penetración aumenta a medida que aumenta la labranza del suelo, haciendo que el uso inadecuado del tractor, acabe con esta característica física.

**Figura 9.** Resistencia a la penetración.

#### 4.2 Determinación de densidad Aparente Da. y Dr.

La Da, es un valor que varía con la textura del suelo y se usa para convertir datos expresados, en concentraciones a masa o volumen, cálculos muy utilizados en la fertilización de cultivos (Peña, 2012). Según Fragoso, Abreu & Molina, *et al* (2010), estos valores para suelos minerales son de 1.47 a 1.90 g.cm<sup>-3</sup>; suelos orgánicos de 0.8 a 0.9 g.cm<sup>-3</sup>; suelos arcillosos de 1.0 a 1.5 g.cm<sup>-3</sup>; suelos arenosos 1.4 a 1.7 g.cm<sup>-3</sup> y suelos francos de 1.0 a 1.3 g.cm<sup>-3</sup> aproximadamente. En el presente estudio realizado a los diferentes sistemas de producción, los valores obtenidos de la Da. oscilaron en un rango de 0.72 y 0.90 g.cm<sup>-3</sup>, correspondiendo a texturas franco arcillo arenosa y arcillosa, respectivamente. Cabe destacar que ninguno de los valores obtenidos alcanzó a llegar al valor estándar reportado anteriormente, con lo que se puede inferir que hay una alta posibilidad, debido a la presencia de materia orgánica. De acuerdo con Khalajabadi, (2005), a mayor compactación del suelo, mayor será la Da, además, a mayor contenido de materia orgánica, menor será este valor, pero también puede variar estacionalmente

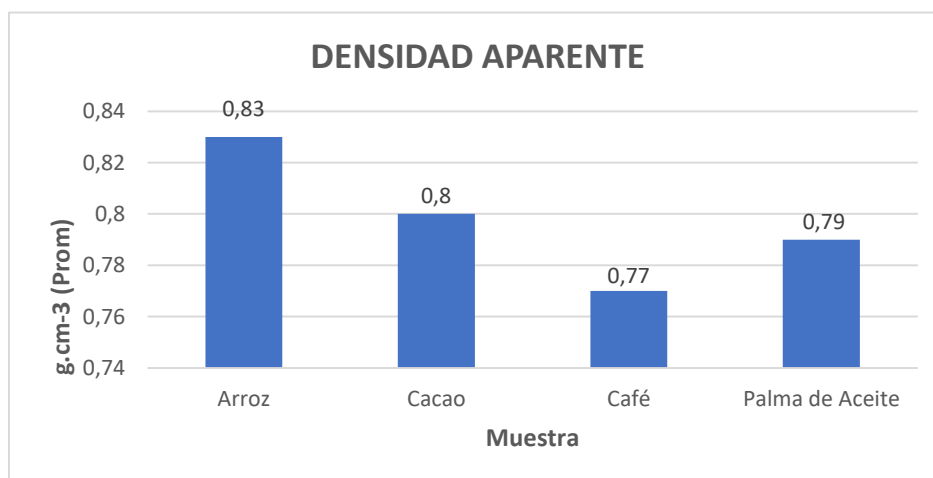


por efecto de labranzas y con la humedad del suelo, sobre todo en los suelos con arcillas expandentes (Álvarez, 2008).

Esta es una de las propiedades físicas del suelo más importante, no sólo porque a partir de ella se pueden determinar otras propiedades, si no por los cambios a la que es sometida constantemente, ya sea por el asentamiento que sufre el suelo después de ser removido, o por la compactación que ocurre en el suelo, debido a los cambios que experimenta la porosidad ante fuerzas externas, como puede ser el peso ejercido por los implementos que se utilizan sobre el mismo en las labores agrotécnicas, y el peso ejercido por las láminas de riego aplicadas (Lazo, Seijas, & Robaina, 2021). Además, afecta al crecimiento de las plantas, debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Cuando la  $D_a$  incrementa, la resistencia del suelo a la penetración de las raíces tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir; con estos cambios, se reduce el crecimiento de las raíces a valores críticos (Gutiérrez, 2010).

En promedio, la mayor  $D_a$ , reportada en este estudio, obedece al cultivo de arroz con  $0,83 \text{ g.cm}^{-3}$ , seguida por cacao con  $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$ , palma de aceite  $0,79 \text{ g.cm}^{-3}$  y café con  $0,77 \text{ g.cm}^{-3}$  (figura 10).

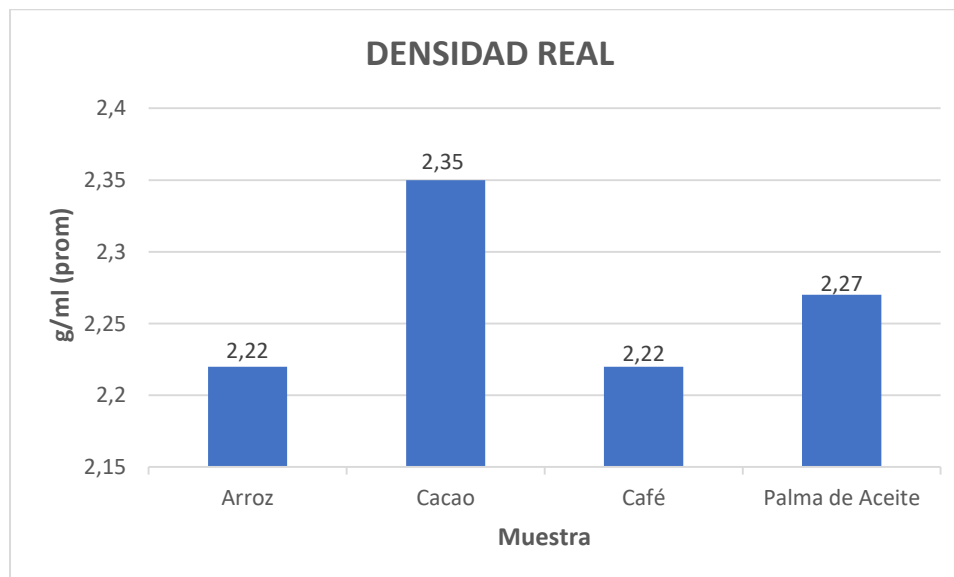
**Figura 10.** Densidad aparente.



Por otro lado, los valores de  $D_r$ , para la mayoría de suelos de origen mineral es de 2.5 a 3 g/ml, suelos orgánicos de 1.50 a 2.4 g/ml; suelos arenosos 2.6 g/ml y suelos arcillosos 2.4 g/ml (Fragoso, Abreu, & Molina, 2015). En este estudio, los valores oscilaron entre 2.04 y 2.56 g/ml con textura arcillo limosa y franco arenoso, respectivamente; el cultivo de cacao presentó la mayor densidad real, con 2,35 g/ml, palma de aceite con 2,27 g/ml, café y arroz con 2,22 g/ml (ver figura 11). Como lo menciona U.N.L.P (2019), su valor se relaciona con la porosidad y densidad aparente, y al aumentar el contenido de materia orgánica se reduce la densidad real de los suelos.

La  $D_r$  es una propiedad poco importante desde el punto de vista de la degradación del suelo; lo que resulta interesante, es su relación con la densidad aparente, ya que con ella se determina la porosidad total del suelo, y esta propiedad está muy influenciada por los usos del mismo (Avalos y Vásquez, 2007). Su valor cambia en función del tipo de minerales del material madre y de la cantidad de materia orgánica del suelo. Puesto que la materia orgánica pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, la cantidad de ese constituyente en un suelo, afecta marcadamente a la densidad de las partículas (Gutiérrez, 2010).

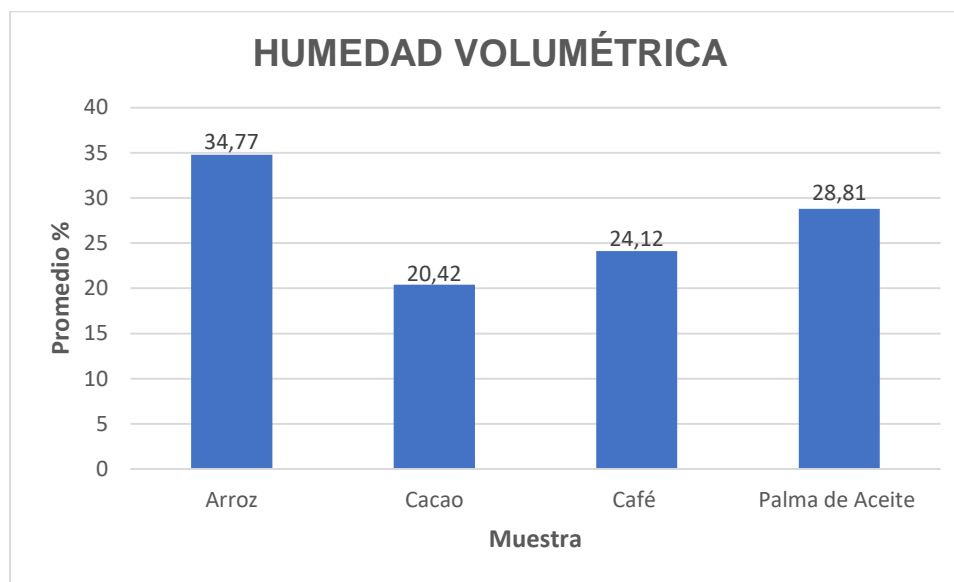
**Figura 11.** Densidad real.



### 4.3 Determinación de humedad volumétrica

Los datos obtenidos en cuanto a la humedad volumétrica evaluada en campo, oscilaron en un rango de 15.4 y 49.3 %; los valores más altos encontrados en este estudio fueron 46.8 y 49.3% que poseen texturas Arcillosas, perteneciendo al cultivo de arroz; por otro lado, los resultados más bajos corresponden a 15.4 y 16.7%, siendo de textura Franco arenosa, perteneciendo a los cultivos de arroz y café, respectivamente. En promedio, la mayor HumVol, la obtuvo el cultivo de arroz con 34,77 %, seguida por palma de aceite con 28,81%, café con 24,12 y cacao con 20,42% (ver figura 12).

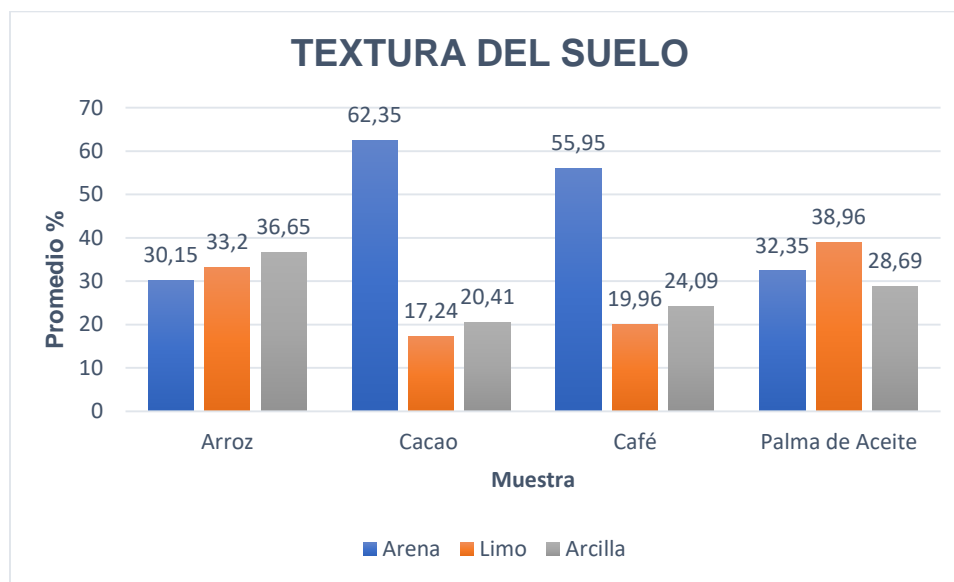
La humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión total de agua y color del suelo. La humedad del suelo es muy dinámica y depende del clima, vegetación, profundidad del suelo, y de las características y condiciones físicas del perfil (Martínez, 2010). Además, es un factor de vital importancia para un adecuado desarrollo de las plantas, que afectan directamente al rendimiento (Agrícola, 2021), en particular en su nutrición, debido a que funciona como medio de transporte de los elementos, a través de un mecanismo de flujo de masa, lo cual incrementa el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, puesto que sin la humedad necesaria para aprovecharse por las plantas, estas no crecen de manera idónea (Henríquez, 2015).

**Figura 12.** Humedad volumétrica

#### 4.4 Determinación de textura

De las 40 muestras evaluadas en este estudio, se encontraron 8 clases texturales, correspondiendo el 30% (12 muestras) a la textura Franco arcillo arenosa, seguida por 22.5% (9 muestras) para franco arenosa, 20% (8 muestras) para franca, 10% (4 muestras) para franco arcillosa, 5 % (2 muestras) para arcillosa, 5% (2 muestras) franco arcillo limosa, 5% (2 muestras) arcillo limosa y 2.5% (1 muestras) para franco limosa.

En cuanto a la distribución de los separados del suelo, el cultivo de arroz presentó en promedio un 30.15 % de A, 33,2% de L y 36,65% de Ar, para cacao 62.35% de A, 17,24% de L, y 20,41% de Ar, para café 55,95% de A, 19.96% de L y 24,09 de Ar, y para el cultivo de palma de aceite 32,35% de A, 38,96% de L y 28.69% de Ar (ver figura 13).

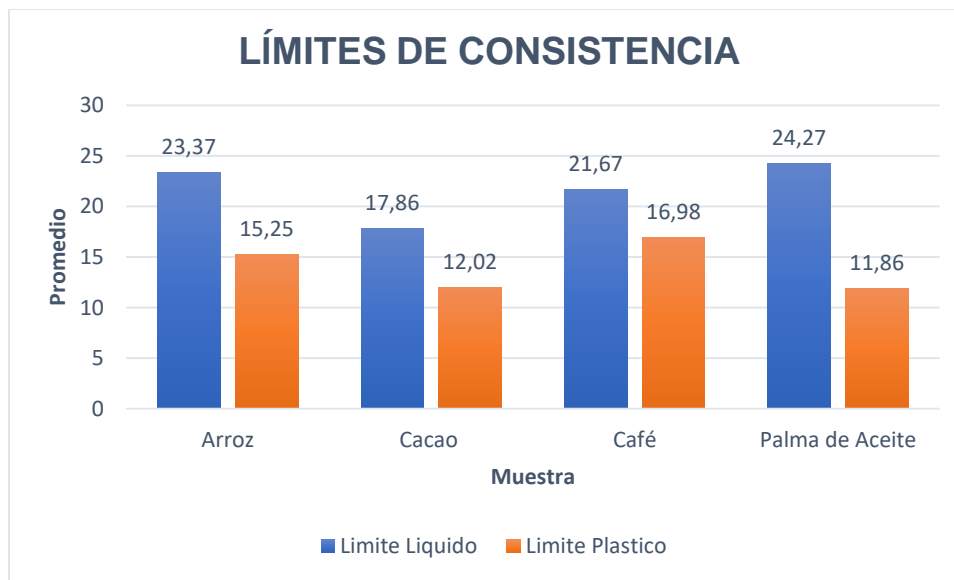
**Figura 13.** Distribución de clases texturales.

#### 4.5 Determinación de límites de consistencia

Los valores obtenidos en la determinación de los límites de consistencia líquido, oscilaron en un rango de 12.11 y 43.17, mientras que para el límite plástico fueron de 8.27 y 20.23. Estos valores dependen de la cantidad y tipo de arcilla en el suelo, por lo cual, varía de un suelo a otro (Conde, 2018). El Límite Líquido LL es el contenido de humedad por encima del cual, la mezcla suelo-agua, pasa o se acerca a un estado líquido. En este estado, la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual, la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado, la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión (Unknown, 2010, Yazmin & Fernando, 2018). Esto se refiere a la capacidad que presenta el suelo para cambiar de volumen y por consiguiente, de forma, lo cual depende directamente de la humedad del suelo, así como de su composición

mineralógica y de la concentración de sales, ya que se relaciona con la fuerza de atracción que presentan las partículas entre ellas o como agregados (Galván, 2019).

**Figura 14.** Límites de consistencia.



#### 4.6 Análisis de componentes principales (ACP)

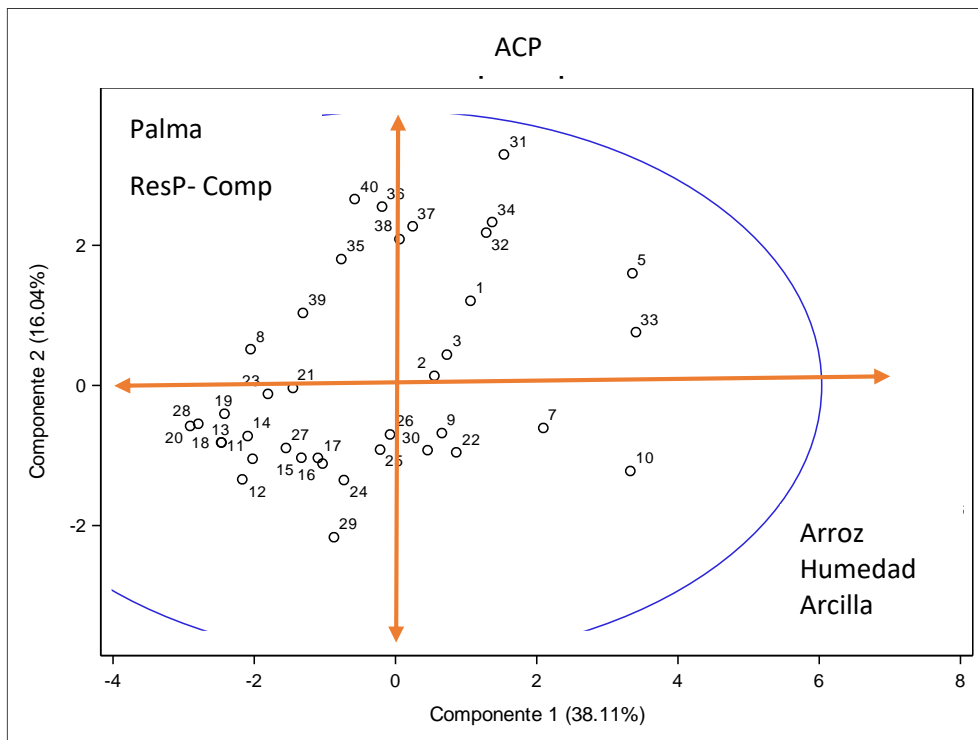
La desviación estándar mínima obtenida fue de 0,03 para Da. y 0,10 para Dr. y máxima de 19.5 para texturas arenosas y 173.8 para la resistencia a la penetración (ver tabla 2), con una media de 0.79, 2.26, 45,2 y 521,8 respectivamente.

**Tabla 2.** Procedimiento MEANS

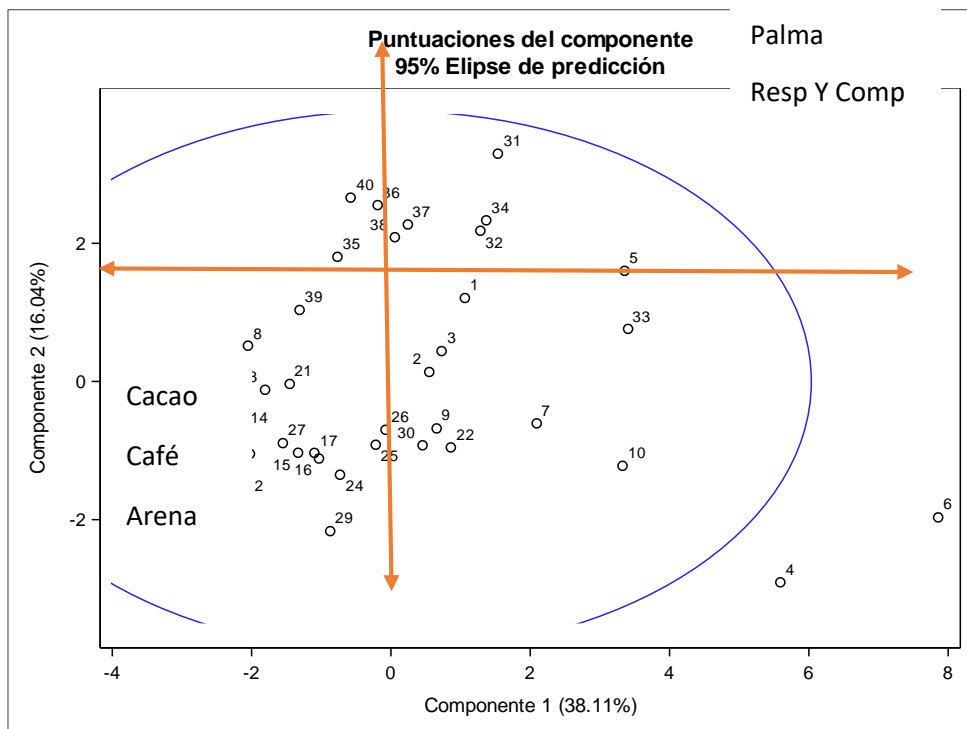
Variable	Media	Desv. est.	Coef. de variación	Varianza	Mínimo	Máximo
Mues	20.5000000	11.6904519	57.0265949	136.6666667	1.0000000	40.0000000
Torc	6.1800000	1.7219845	27.8638276	2.9652308	3.0000000	10.4000000
ResP	521.8500000	173.8050116	33.3055498	30208.18	167.0000000	793.0000000
Da	0.7992500	0.0355461	4.4474327	0.0012635	0.7200000	0.9000000
Dr	2.2647500	0.1038981	4.5876174	0.0107948	2.0400000	2.5600000
Lpla	14.0272500	3.2433901	23.1220668	10.5195794	8.2900000	20.6000000
Lliq	21.7910000	6.3447640	29.1164424	40.2560297	12.5300000	43.1700000
HumV	27.0300000	8.8387318	32.6997106	78.1231795	15.4000000	49.3000000
Poros	63.8525000	6.1120150	9.5720840	37.3567269	29.0000000	69.6000000
Inte	1.0250000	0.1581139	15.4257447	0.0250000	1.0000000	2.0000000
Ar	27.4600000	12.6361265	46.0164839	159.6716923	7.6500000	72.4500000
L	27.3400000	12.1560959	44.4626769	147.7706667	10.0000000	54.4000000
A	45.2000000	19.5984693	43.3594454	384.1000000	3.1500000	73.1500000
Text	4.8000000	2.3772425	49.5258861	5.6512821	1.0000000	8.0000000

Según el ACP, para la determinación de la resistencia del suelo a la penetración de las raíces en diferentes sistemas de producción agrícola, se evidencia que los resultados obtenidos, con una significancia del 54.15%, el eje X, separa la humedad y texturas arcillosas versus (vs) resistencia a la penetración y compactación (ver figura 15). El eje Y, separa resistencia a la penetración y compactación vs, texturas arenosas (ver figura 16), donde en el caso de cultivos como arroz, cacao y café, están relacionados con la humedad, contenido de arcillas y arenas. El cultivo de palma presenta condiciones de resistencia a la penetración y compactación.

**Figura 15.** Análisis de componentes principales (ACP). El eje X, separa la humedad y contenido de arcillas versus (vs) resistencia a la penetración y compactación.



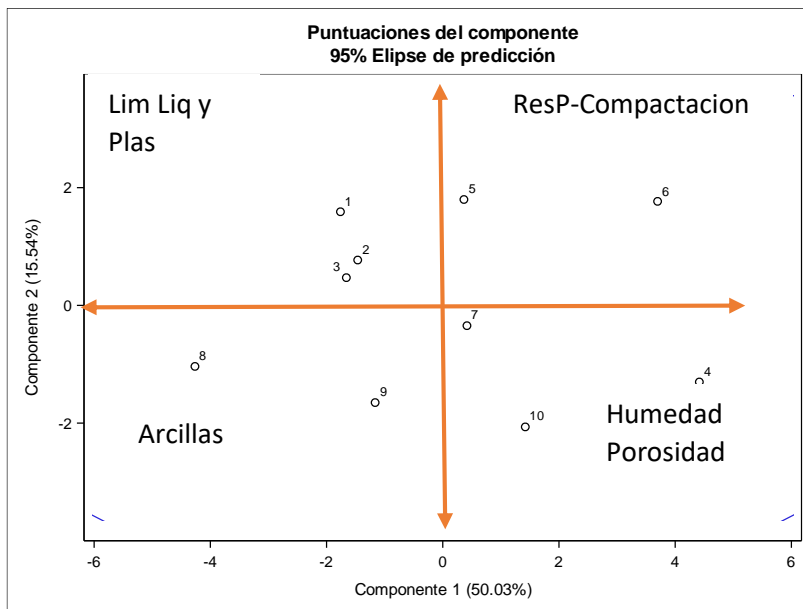
**Figura 16.** Análisis de componentes principales (ACP). El eje Y, separa resistencia a la penetración y compactación vs, texturas arenosas.





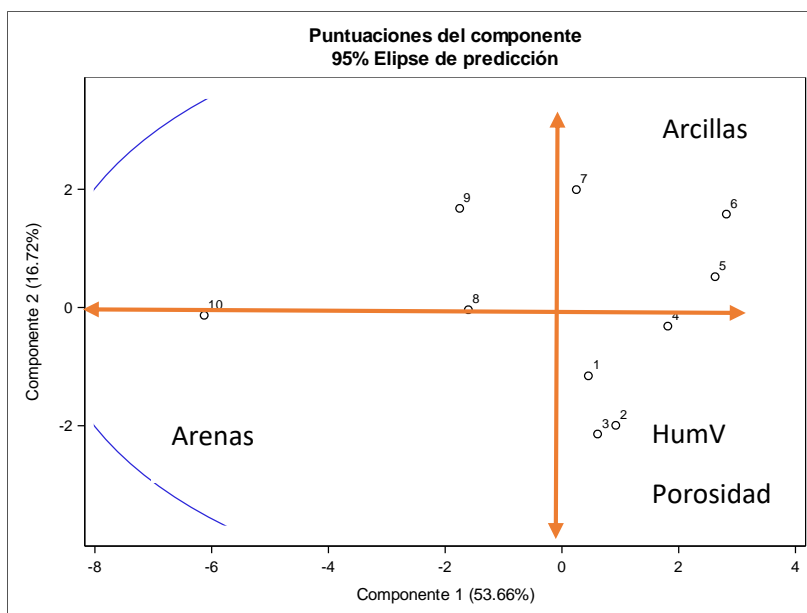
Para el caso del cultivo de arroz, el eje X, separa la humedad volumétrica y porosidad vs, límite líquido y plástico, El eje Y, separa la resistencia a la penetración y compactación vs, texturas arcillosas.

**Figura 17.** Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de arroz.



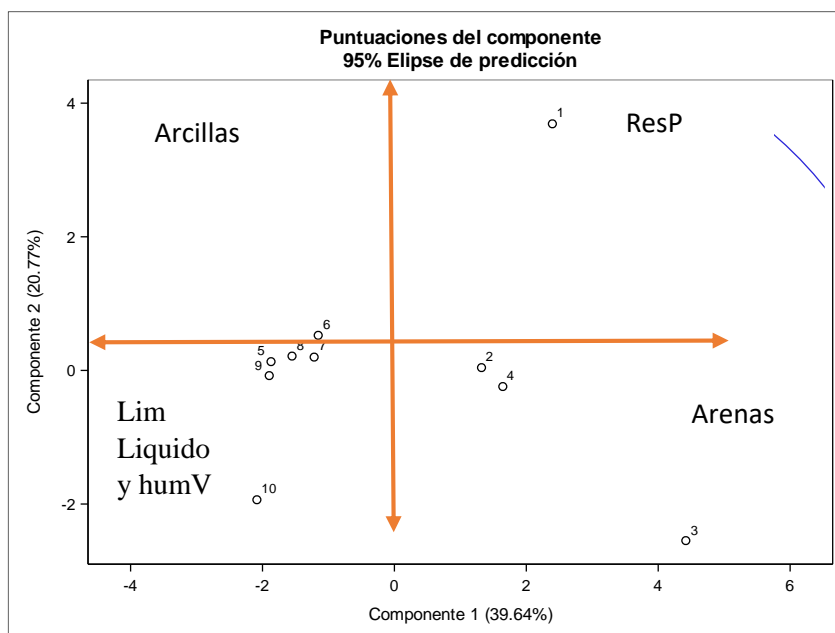
Para el cultivo de cacao, el eje X, separa la humedad volumétrica y porosidad vs, texturas arenosas. El eje Y, separa texturas arcillosas vs, texturas arenosas.

**Figura 18.** Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de cacao.



Y en el cultivo de palma, el eje X, separa las texturas arenosas vs, arcillosas, y el eje Y, separa resistencia a la penetración vs, límite líquido y humedad volumétrica.

**Figura 19.** Análisis de componentes principales (ACP) cultivo de palma.



De igual manera, en la matriz de covarianza, el cultivo de arroz presenta diferencias altamente significativas, ya que es un cultivo transitorio en comparación con el cultivo de cacao, café y palma, que son cultivos permanentes (ver tabla 3).

**Tabla 3.** Matriz de covarianza

<b>Información de la matriz de covarianza intra</b>		
<b>Cultivo</b>	<b>Ranking de la matriz de covarianza</b>	<b>Log natural del determinante de la matriz de covarianza</b>
<b>ARROZ</b>	9	-50.29991
<b>CACAO</b>	9	-70.20446
<b>CAF</b>	9	-62.48823
<b>PALMA</b>	9	-56.13265
<b>Agrupado</b>	12	-1.30192

## 5. Conclusiones

Se concluye de manera general, que las propiedades físicas evaluadas, presentan variación positiva, en propiedades como resistencia a la penetración y compactación, en el cultivo de palma. Por otro lado, para el cultivo de arroz, café y cacao, propiedades tales como humedad volumétrica, texturas arenosas y arcillosas, presentan valores que se pueden considerar de alarma para establecer prácticas agrícolas y mantener la calidad de los suelos.

En el caso del cultivo de arroz, presentan variación positiva, resistencia a la penetración, compactación, limite líquido y plástico. Las propiedades que se pueden considerar de alarma, son la humedad volumétrica, porosidad y texturas arcillosas.

Para el cultivo de cacao, la propiedad que presenta variación positiva son las texturas arcillosas, y las propiedades que se pueden considerar de alarma son, la humedad volumétrica, porosidad y texturas arenosas.

En el cultivo de palma, propiedades como las texturas arcillosas y resistencia a la penetración, presentan variación positiva; por otro lado, propiedades como humedad volumétrica, limite líquido y texturas arenosas, se pueden considerar de alarma para establecer prácticas agrícolas y mantener la calidad de estos suelos.

## 6. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación, se plantean una serie de recomendaciones para los diferentes sistemas de producción agrícola.

Es indispensable que cuando se quieran establecer (sembrar) sistemas agronómicos en terrenos con pendientes altas, como es el caso del cultivo de cacao y café, se realice siempre siguiendo las curvas de nivel, cultivos en fajas, zanjas en contorno de las laderas más inclinadas de las fincas y construcción de terrazas para suavizar el paisaje.

Es necesario, cuando se tengan pendientes altas en el terreno, establecer sistemas de plantación de bosques y barreras vegetativas, que ayuden a minimizar el efecto erosivo.

Se recomienda dejar de realizar las prácticas de inundación de los cultivos, como es el caso de arroz, ya que esta práctica disminuye la porosidad y por lo tanto, el contenido de oxígeno; produce daños en la estructura física, genera erosión, aumentando el contenido de arenas de poca retención hídrica, inertes desde el punto de vista químico, carentes de propiedades coloidales y de reserva de nutrientes.

También se debe tener en cuenta el sombrío que posee el cultivo, debido a que cuando este tiene un porcentaje alto, influirá en el contenido de humedad, lo cual puede verse reflejado en la resistencia a la penetración.

## 7. Referencias bibliográficas

- Á. Castro Rincón, & M. (2008). Caracterización física de los suelos sulfatados ácidos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (Boyacá) y su aplicación al manejo.
- Agricola, P. T. (2021). La humedad del suelo y como monitorearla.
- Álvarez, M. T. (2008). Fertilidad Física de los Suelos
- Amézquita, E. (2004). La fertilidad física del suelo.
- Angulo, J. R. (2020). El medidor de humedad o tensiómetro para el suelo y las plantas.
- Aruani, M. C. (2004). Efecto de la granulometría y la compactación del suelo sobre la distribución de raíces en manzano.
- Avilés, A. J. (2018). Calidad del suelo empleado con fines agrícolas en el valle de Joa, cantón Jipijapa.
- Batey, T. (2009). Compactación del suelo y manejo del suelo: una revisión.
- Belisario Volverás Mambuscay, É. A. (2016). Indicators of Physical Soil Quality of the Cereal Producing Andean Area of the Department of Nariño, Colombia.
- Cabrera, L. A. (2020). Efecto del compost de residuos orgánicos y estiércol vacuno en suelo franco arenoso de la asociación Vivienda La Bloquetera-Villa María del Triunfo.
- Carrascal, D. L. (2017). Caracterización física de los suelos del centro experimental agropecuario san pablo en el municipio de chinácota norte de santander.
- CIMMYT, C. I. (2013). Resistencia a la Penetración.

- Collazos, A. S. (2015). Influence of the intensity of use on some physical properties in a soil of the Valle del Cauca, Colombia.
- CONDE, C. J. (2018). Guia de ensayos de laboratorio de mecanica de suelos.
- Cruz, M. F. (2007). Estudio fisico-quimicos y aplicacion del metodo complejométrico para la determinacion de calcio y magnesio en una muestra de suelo.
- DANE. (2018). Ficha tecnica trabajo infantil departamento de Norte de Santander .
- DANE. (2020). Ecosistema de economia Naranja Norte de Santander .
- DANE. (2021). Mercado laboral por departamentos.
- DANE. (2022). Perfiles economicos departamentales .
- Demuner, M. G., & Magaña, M. C. (2013). Resistance penetration in a Clay Loam soil after two years of management with three tillage systems.
- Duiker, S. (2007). Effects of Soil Compaction.
- Duiker, S. W. (2002). Diagnosing Soil Compaction Using a Penetrometer (Soil Compaction Tester).
- Elejalde, L. L. (2022). Norte de Santander y Meta, con el mayor desempleo en 2021.
- FAO. (2022). Portal de suelos de la FAO.
- FAO, O. d. (2022). Agricultura Sostenible.
- FAO, O. d. (2022). Conservación del Suelo.
- FAO, P. d. (2022). Degradación del Suelo.

- Fernández, C. E. (2021). Caracterización físico-química de suelos y contenido de nutrientes foliares y su relación con la incidencia de la pudrición de cogollo en palma africana (*elaeis guineensis jacq*) en el municipio de zona bananera. magdalena.
- Fragoso, C. Á., Abreu, J. D., & Molina, A. M. (2015). Determinación de la densidad real y porosidad del suelo .
- Frangoso, C. Á., Abreu, J. D., & Molina, A. M. (2015). Determinación de densidad aparente del suelo.
- Galván, I. N. (2019). Efecto de NanoSiO<sub>2</sub> sobre los límites de consistencia en arcillas del exLago de Texcoco.
- Gabriel Zerpa, O. S. (2013). La resistencia mecánica a la penetración en pasturas .
- Gutiérrez, A. M. (2010). La densidad aparente de los suelos forestales del parque natural los Alcornocales.
- Guzmán, R. D. (2016). Determination of the resistance to penetration of a cohesive soil under different conditions of hydration and compaction
- Guzmán, R. D. (2016). Determination of the resistance to penetration of a cohesive soil under different conditions of hydration and compaction
- Henríquez, C., Orti, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., & Gómez, P. V. (2011). Penetration resistance, tangential shear strength, bulk density and temperature in a soil planted with coffe, Juan Viñas, Costa Rica .
- Henríquez, K. L. (2015). Spatial distribution of moisture and its relation with soil texture.
- Hermosillo, R. E. (2013). Resistencia el esfuerzo cortante de los suelos .



Holguín, N. J., & Will, L. O. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales .

IAEA, O. I. (2022). Mejora de la fertilidad del suelo.

Ibáñez, J. J. (2006). Las Raíces de las Plantas y los Suelos: Profundidad de Enrizamiento.

IGAC, I. G. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos .

Ingaramo, O., Paz Ferreiro, J., & Mirás Avalos J.M. y Vidal Vásquez, E. (2007). General soil properties characterization in an experimental plot with different management systems

Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo.

Jiménez, R. R. (2014). Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un Andisol-Marinilla la montaña.

Khalajabadi, A. S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana

Lancheros, M. R. (2012). Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá.

LAPACA. (2022). Penetrometro LAPACA.

Lazo, G. C., Seijas, T. L., & Robaina, J. H. (2021). Variation of Bulk Density for different water contents in Cuban soils.

López, C. T. (2017). El principio de relatividad (1): movimiento relativo.

- Martínez, L. F. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos.
- Martines, M. M. (2017). Uso de materia orgánica y microorganismos en el manejo integrado de la nutrición.
- MINAGRICULTURA. (2017). Principales cultivos por area sembrada.
- Molina, E. (Sf). Análisis de suelos y su interpretación.
- Molina, G. D., Zapata, M. C., & Magaña, S. G. (2013). Resistance penetration in a Clay Loam soil after two years of management with three tillage systems.
- Orjuela, H. B. (2016). Quality and soil health influence on the nature and society.
- OVIEDO, G. H. (2012). Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (*saccharum officinarum*) bajo la aplicación de biosólidos.
- Palacio, G. N. (2017). Effect of the oil palm plantations on the physical properties of the soil and his relation with the production and the bud rot disease.
- Pérez, M., García, A., Paredes, A., & Luna, P. M. (2016). Resistencia mecánica del suelo a la penetración de raíces y forma de la raíz reservante de la batata a partir del descriptor de huamán.
- Peña, J. M. (2012). Densidad aparente.
- Quintero, V. E. (2013). Importance and utility of microbial elements in evaluating soil quality: case studies in silvopastoral systems.
- Rojas, J. M. (2012). Comparación de métodos de determinación en Ensayo de rotaciones en siembra directa .

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., & Hill, J. P. (2004). Propiedades Físicas del Suelo.

Schlatter, J., & Gerding., R. G. (2003). Principios para el Muestreo de Suelos.

Singer, M. &. (2000). Soil quality. Handbook of soil science.

Urriola, S. L. (2020). ¿Por qué estudiar las propiedades físicas del suelo?

U.N.L.P, D. d. (2019). Porosidad y aireacion densidad real y aparente.

Unknown. (2010). Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg - Índices

Yazmín, H. G., & Fernando, R. C. (2018). Variación de los límites de consistencia de una arcilla blanda nanomodificada.

Zotarelli, L., & Morgan, M. D. (2013). Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad.

## **Anexos**

### Anexo 1. Resistencia del suelo a la penetración de las raíces

CULTIVO	# MUESTRA	FUERZA DE PENETRACIÓN		Da	Dr	LÍMITES DE CONSISTENCIA		HUMEDAD %V	POROSIDAD %		TEXTURA
		TORCÓMETRO	PENETRÓMETRO (N)			PLÁSTICO	LÍQUIDO		VALOR	INTERPRETACIÓN	
ARROZ	1	8.4	400	0,82	2,3	13,38	19,49	22,8	64	Alta	Franca
ARROZ	2	7.0	793	0,83	2,24	15,54	22,89	27,6	62,63	Alta	Franca
ARROZ	3	7.6	393	0,83	2,27	13,04	19,66	24,4	63,17	Alta	Franca
ARROZ	4	3.3	187	0,9	2,07	19,67	32,38	46,8	56,17	Alta	Arcillosa
ARROZ	5	9.3	413	0,82	2,25	18,22	26,55	40,3	63,17	Alta	Franco arcilloso limosa
ARROZ	6	6.9	247	0,86	2,12	16,63	29,55	45,5	29	Muy baja	Arcillo limosa
ARROZ	7	4.4	220	0,79	2,18	17,03	24,88	33,8	63,39	Alta	Franco arcillosa
ARROZ	8	8.3	647	0,82	2,38	9,52	13,93	15,4	65,49	Alta	Franco arenosa
ARROZ	9	7.0	403	0,81	2,22	14,82	21,02	41,8	63,35	Alta	Franco arcillo arenosa
ARROZ	10	5.2	167	0,85	2,19	14,68	23,3	49,3	60,96	Alta	Arcillosa
CACAO	11	4.5	753	0,8	2,29	11,28	18,84	24,3	64,97	Alta	Franco arenosa
CACAO	12	4.8	717	0,81	2,32	11,22	17,36	17	65,09	Alta	Franco arcillo arenosa
CACAO	13	5.2	740	0,79	2,36	11,75	18,69	18,4	66,31	Muy alta	Franco arenosa
CACAO	14	5.2	733	0,78	2,4	13,35	19,28	22,9	67,15	Muy alta	Franco arcillo arenosa
CACAO	15	5.0	660	0,78	2,31	13,8	20,18	20,5	65,9	Muy alta	Franco arcillo arenosa
CACAO	16	5.1	673	0,78	2,18	13,86	19,86	19,6	63,14	Alta	Franco arcillo arenosa
CACAO	17	4.6	417	0,8	2,28	11,23	17,23	22,3	64,65	Alta	Franco arcillo arenosa
CACAO	18	4.6	560	0,8	2,37	12,83	16,78	20,9	67,24	Muy alta	Franco arenosa
CACAO	19	4.6	480	0,77	2,41	11,32	16,33	20,5	63,45	Alta	Franco arenosa
CACAO	20	3.6	333	0,87	2,56	9,52	14,09	17,8	69,6	Muy alta	Franco arenosa
CAFÉ	21	7.2	673	0,77	2,33	14,93	22,12	21,4	67,13	Muy alta	Franco arcillo arenosa
CAFÉ	22	5.1	560	0,76	2,2	20,6	26,26	35,7	64,95	Alta	Franco arcillosa
CAFÉ	23	6.0	667	0,77	2,37	14,44	18,11	35,1	66,52	Muy alta	Franco arenosa
CAFÉ	24	5.2	727	0,79	2,21	20,23	23,78	21,1	64,58	Alta	Franco arcillo arenosa
CAFÉ	25	6.2	327	0,78	2,21	16,9	19,81	25,7	63,98	Alta	Franco arcillo arenosa
CAFÉ	26	6.6	580	0,79	2,13	17,75	21,16	26	67,77	Muy alta	Franco arcillo arenosa
CAFÉ	27	5.1	460	0,72	2,21	15,77	19,24	19,9	65,41	Muy alta	Franco arcillo arenosa
CAFÉ	28	4.6	600	0,76	2,28	12,93	16,11	18,6	66,68	Muy alta	Franco arenosa
CAFÉ	29	3.0	387	0,75	2,07	19,09	24,21	16,7	63,77	Alta	Franco arenosa

CAFÉ	30	4.6	567	0,8 5	2,1 9	17,16	25,89	21	64,0 6	Alta	Franco arcillosa
PALM A	31	10.4	500	0,7 9	2,3 5	11,42	43,17	34,8	66,4 3	Muy alta	Franco limosa
PALM A	32	8.0	720	0,8 1	2,2	10,46	38,64	26,8	63,2 2	Alta	Franco arcillosa
PALM A	33	8.0	333	0,8 1	2,0 4	17,28	21,7	36,1	60,3 9	Alta	Arcillo limosa
PALM A	34	7.7	520	0,7 6	2,2 2	15,18	19,2	28,6	65,7 2	Muy alta	Franco arcillo limosa
PALM A	35	7.2	447	0,7 7	2,3 5	11,04	15,63	25,8	67,0 8	Muy alta	Franca
PALM A	36	7.3	597	0,7 6	2,3 2	13,71	20,77	27,1	67,2 7	Muy alta	Franca
PALM A	37	7.4	573	0,8	2,3 2	10,71	29,23	32,3	65,6 4	Muy alta	Franca
PALM A	38	7.6	340	0,7 8	2,3	11,78	26,87	26,5	65,9 3	Muy alta	Franca
PALM A	39	7.8	580	0,8 1	2,3 2	8,29	14,92	31,2	65,2 2	Muy alta	Franco arcillo arenosa
PALM A	40	7.6	780	0,8 3	2,2 7	8,73	12,53	18,9	63,5 2	Alta	Franca

**Anexo 2. Clasificación de la porosidad total del suelo**

<b>Porosidad Total ( % )</b>	<b>Calificación</b>
> 65	Muy alta
55 – 65	Alta
45 – 55	Medio
40 – 45	Baja
< 40	Muy baja

Fuente: Cabrera, 2020 cita a Hernández, 2007

### Anexo 3. Procedimiento de correlación estadísticas simples (ACP)

Estadísticos simples						
Variable	N	Media	Desv. est.	Suma	Mínimo	Máximo
<b>Torc</b>	40	6.18000	1.72198	247.20000	3.00000	10.40000
<b>ResP</b>	40	521.85000	173.80501	20874	167.00000	793.00000
<b>Da</b>	40	0.79925	0.03555	31.97000	0.72000	0.90000
<b>Dr</b>	40	2.26475	0.10390	90.59000	2.04000	2.56000
<b>Lpla</b>	40	14.02725	3.24339	561.09000	8.29000	20.60000
<b>Lliq</b>	40	21.79100	6.34476	871.64000	12.53000	43.17000
<b>HumV</b>	40	27.03000	8.83873	1081	15.40000	49.30000
<b>Poros</b>	40	63.85250	6.11201	2554	29.00000	69.60000
<b>Inte</b>	40	1.02500	0.15811	41.00000	1.00000	2.00000
<b>Ar</b>	40	27.46000	12.63613	1098	7.65000	72.45000
<b>L</b>	40	27.34000	12.15610	1094	10.00000	54.40000
<b>A</b>	40	45.20000	19.59847	1808	3.15000	73.15000
<b>Text</b>	40	4.80000	2.37724	192.00000	1.00000	8.00000



## Anexo 4. Matriz de correlación (ACP)

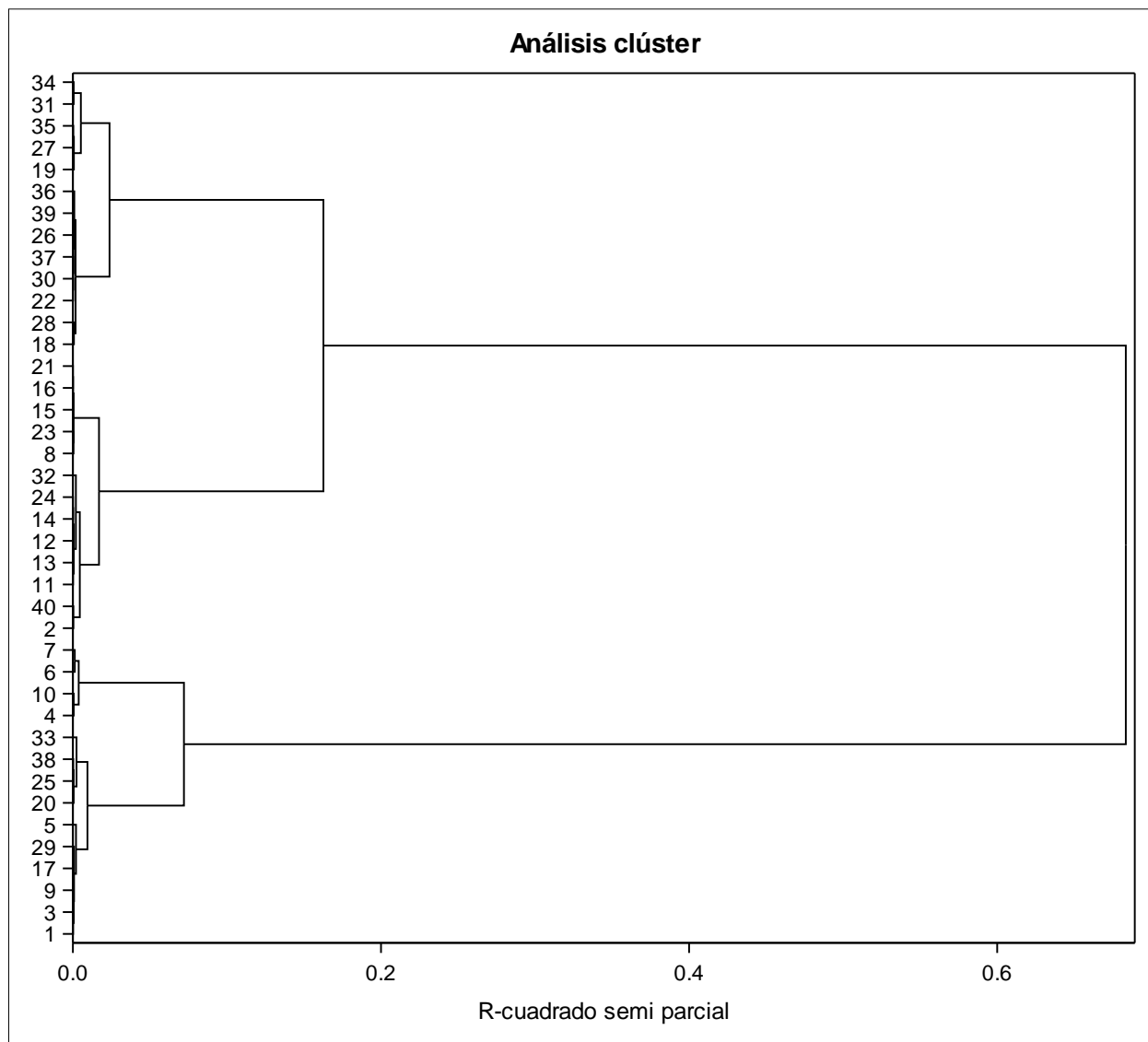
Matriz de correlación														
	Mues	Torc	ResP	Da	Dr	Lpla	Lliq	Hum V	Poros	Inte	Ar	L	A	Text
Mues	1.000 0	0.190 4	0.178 9	- .4236	0.026 7	- .2185	0.030 2	- .1927	0.311 2	- .2011	- .2242	0.153 1	0.049 6	- .0101
Torc	0.190 4	1.000 0	0.077 5	0.007 3	0.062 2	- .2430	0.270 9	0.235 5	- .0367	0.067 8	0.093 2	0.684 1	- .4844	- .3142
ResP	0.178 9	0.077 5	1.000 0	- .3016	0.333 8	- .3091	- .2102	- .5536	0.383 6	- .2564	- .4400	- .2651	0.448 1	0.244 6
Da	- .4236	0.007 3	- .3016	1.000 0	- .0823	- .0520	0.165 2	0.379 7	- .4293	0.277 2	0.505 2	0.083 6	- .3776	- .3113
Dr	0.026 7	0.062 2	0.333 8	- .0823	1.000 0	- .6993	- .3888	- .4213	0.462 7	- .2259	- .6760	- .1717	0.542 4	0.118 1
Lpla	- .2185	- .2430	- .3091	- .0520	- .6993	1.000 0	0.323 7	0.372 0	- .2658	0.130 1	0.480 9	0.032 4	- .3302	0.026 5
Lliq	0.030 2	0.270 9	- .2102	0.165 2	- .3888	0.323 7	1.000 0	0.504 3	- .2997	0.198 3	0.479 6	0.417 9	- .5684	- .0769
Hum V	- .1927	0.235 5	- .5536	0.379 7	- .4213	0.372 0	0.504 3	1.000 0	- .5022	0.338 9	0.685 3	0.397 6	- .6885	- .2955
Poros	0.311 2	- .0367	0.383 6	- .4293	0.462 7	- .2658	- .2997	- .5022	1.000 0	- .9247	- .5623	- .2543	0.520 3	0.168 3
Inte	- .2011	0.067 8	- .2564	0.277 2	- .2259	0.130 1	0.198 3	0.338 9	- .9247	1.000 0	0.320 7	0.227 6	- .3479	- .0546
Ar	- .2242	0.093 2	- .4400	0.505 2	- .6760	0.480 9	0.479 6	0.685 3	- .5623	0.320 7	1.000 0	0.249 5	- .7995	- .2843
L	0.153 1	0.684 1	- .2651	0.083 6	- .1717	0.032 4	0.417 9	0.397 6	- .2543	0.227 6	0.249 5	1.000 0	- .7811	- .4909
A	0.049 6	- .4844	0.448 1	- .3776	0.542 4	- .3302	- .5684	- .6885	0.520 3	- .3479	- .7995	- .7811	1.000 0	0.487 8
Text	- .0101	- .3142	0.244 6	- .3113	0.118 1	0.026 5	- .0769	- .2955	0.168 3	- .0546	- .2843	- .4909	0.487 8	1.000 0

### Anexo 5. Autovalores de la matriz de correlación (ACP)

Autovalores de la matriz de correlación				
	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	5.33517001	3.08968196	0.3811	0.3811
2	2.24548805	0.62848071	0.1604	0.5415
3	1.61700735	0.43640290	0.1155	0.6570
4	1.18060444	0.33688148	0.0843	0.7413
5	0.84372296	0.13728463	0.0603	0.8016
6	0.70643833	0.04875062	0.0505	0.8520
7	0.65768771	0.22273278	0.0470	0.8990
8	0.43495493	0.07701107	0.0311	0.9301
9	0.35794386	0.12490660	0.0256	0.9556
10	0.23303726	0.02625658	0.0166	0.9723
11	0.20678068	0.04298743	0.0148	0.9871
12	0.16379325	0.14642208	0.0117	0.9988
13	0.01737116	0.01737116	0.0012	1.0000
14	0.00000000		0.0000	1.0000

**Anexo 6. Autovalores de la matriz de covarianza (ACP)**

<b>Autovalores de la matriz de covarianza</b>				
	<b>Autovalor</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Proporción</b>	<b>Acumulado</b>
<b>1</b>	30361.5696	29861.8598	0.9771	0.9771
<b>2</b>	499.7098	379.0178	0.0161	0.9931
<b>3</b>	120.6920	86.9476	0.0039	0.9970
<b>4</b>	33.7444	8.9709	0.0011	0.9981
<b>5</b>	24.7734	2.9713	0.0008	0.9989
<b>6</b>	21.8021	14.1592	0.0007	0.9996
<b>7</b>	7.6429	4.0414	0.0002	0.9998
<b>8</b>	3.6016	2.5100	0.0001	1.0000
<b>9</b>	1.0916	1.0873	0.0000	1.0000
<b>10</b>	0.0043	0.0028	0.0000	1.0000
<b>11</b>	0.0015	0.0009	0.0000	1.0000
<b>12</b>	0.0005	0.0005	0.0000	1.0000
<b>13</b>	-0.0000		-0.0000	1.0000

**Anexo 7. Análisis Clúster (ACP)**

**CLUSTER=1**

Mues	Torc	ResP	Da	Dr	Lpla	Lliq	HumV	Poro	Inte	Ar	L	A	Text
2	7.0	793	0.83	2.24	15.54	22.89	27.6	62.63	1	26.45	28.4	45.15	1
8	8.3	647	0.82	2.38	9.52	13.93	15.4	65.49	1	18.45	22.4	59.15	6
11	4.5	753	0.80	2.29	11.28	18.84	24.3	64.97	1	16.85	16.0	67.15	6
12	4.8	717	0.81	2.32	11.22	17.36	17.0	65.09	1	26.85	10.0	63.15	7
13	5.2	740	0.79	2.36	11.75	18.69	18.4	66.31	1	20.85	12.0	67.15	6
14	5.2	733	0.78	2.40	13.35	19.28	22.9	67.15	1	24.85	16.0	59.15	7
15	5.0	660	0.78	2.31	13.80	20.18	20.5	65.90	1	32.85	16.0	51.15	7
16	5.1	673	0.78	2.18	13.86	19.86	19.6	63.14	1	26.85	20.0	53.15	7
21	7.2	673	0.77	2.33	14.93	22.12	21.4	67.13	1	26.85	18.0	55.15	7
23	6.0	667	0.77	2.37	14.44	18.11	35.1	66.52	1	12.85	20.0	67.15	6
24	5.2	727	0.79	2.21	20.23	23.78	21.1	64.58	1	26.05	18.8	55.15	7
32	8.0	720	0.81	2.20	10.46	38.64	26.8	63.22	1	33.65	41.2	25.15	5
40	7.6	780	0.83	2.27	8.73	12.53	18.9	63.52	1	24.85	42.0	33.15	1

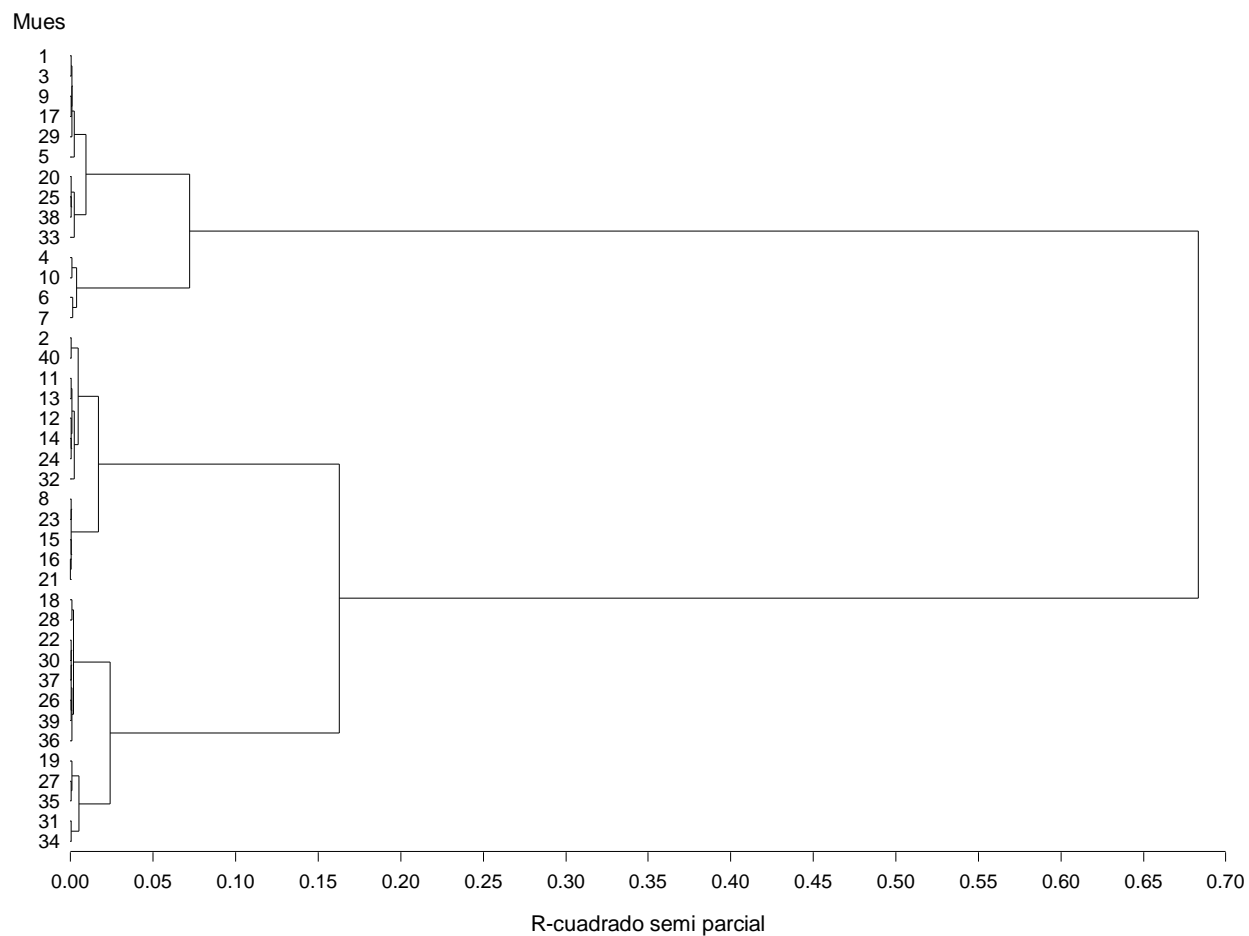
**CLUSTER=2**

Mues	Torc	ResP	Da	Dr	Lpla	Lliq	HumV	Poro	Inte	Ar	L	A	Text
18	4.6	560	0.80	2.37	12.83	16.78	20.9	67.24	1	10.85	18.0	71.15	6
19	4.6	480	0.77	2.41	11.32	16.33	20.5	63.45	1	9.65	23.2	67.15	6
22	5.1	560	0.76	2.20	20.60	26.26	35.7	64.95	1	34.85	24.0	41.15	5
26	6.6	580	0.79	2.13	17.75	21.16	26.0	67.77	1	32.05	20.8	47.15	7
27	5.1	460	0.72	2.21	15.77	19.24	19.9	65.41	1	22.05	18.8	59.15	7
28	4.6	600	0.76	2.28	12.93	16.11	18.6	66.68	1	8.05	18.8	73.15	6
30	4.6	567	0.85	2.19	17.16	25.89	21.0	64.06	1	34.05	22.8	43.15	5
31	10.4	500	0.79	2.35	11.42	43.17	34.8	66.43	1	27.65	51.2	21.15	8
34	7.7	520	0.76	2.22	15.18	19.20	28.6	65.72	1	35.65	53.2	11.15	3
35	7.2	447	0.77	2.35	11.04	15.63	25.8	67.08	1	25.65	29.2	45.15	1
36	7.3	597	0.76	2.32	13.71	20.77	27.1	67.27	1	19.65	45.2	35.15	1
37	7.4	573	0.80	2.32	10.71	29.23	32.3	65.64	1	23.65	33.2	43.15	1
39	7.8	580	0.81	2.32	8.29	14.92	31.2	65.22	1	26.85	20.0	53.15	7

**CLUSTER=3**

<b>Mues</b>	<b>Torc</b>	<b>ResP</b>	<b>Da</b>	<b>Dr</b>	<b>Lpla</b>	<b>Lliq</b>	<b>HumV</b>	<b>Poros</b>	<b>Inte</b>	<b>Ar</b>	<b>L</b>	<b>A</b>	<b>Text</b>
1	8.4	400	0.82	2.30	13.38	19.49	22.8	64.00	1	28.45	40.4	31.15	1
3	7.6	393	0.83	2.27	13.04	19.66	24.4	63.17	1	26.45	30.4	43.15	1
4	3.3	187	0.90	2.07	19.67	32.38	46.8	56.17	1	72.45	18.4	9.15	2
5	9.3	413	0.82	2.25	18.22	26.55	40.3	63.17	1	36.45	54.4	9.15	3
6	6.9	247	0.86	2.12	16.63	29.55	45.5	29.00	2	52.45	44.4	3.15	4
7	4.4	220	0.79	2.18	17.03	24.88	33.8	63.39	1	30.45	46.4	23.15	5
9	7.0	403	0.81	2.22	14.82	21.02	41.8	63.35	1	22.45	26.4	51.15	7
10	5.2	167	0.85	2.19	14.68	23.30	49.3	60.96	1	52.45	20.4	27.15	2
17	4.6	417	0.80	2.28	11.23	17.23	22.3	64.65	1	26.85	20.0	53.15	7
20	3.6	333	0.87	2.56	9.52	14.09	17.8	69.60	1	7.65	21.2	71.15	6
25	6.2	327	0.78	2.21	16.90	19.81	25.7	63.98	1	26.05	20.8	53.15	7
29	3.0	387	0.75	2.07	19.09	24.21	16.7	63.77	1	18.05	16.8	65.15	6
33	8.0	333	0.81	2.04	17.28	21.70	36.1	60.39	1	49.65	41.2	9.15	4
38	7.6	340	0.78	2.30	11.78	26.87	26.5	65.93	1	19.65	33.2	47.15	1

## Anexo 8. Procedimiento TREE (ACP)



### CLUSTER=1

Variable	N	Media	Coef. de variación
Torc	13	6.0846154	22.0583582
ResP	13	714.0769231	6.5616468
Da	13	0.7969231	2.6807807
Dr	13	2.2969231	3.1614448
Lpla	13	13.0084615	23.3281890
Lliq	13	20.4776923	30.8347924
HumV	13	22.2307692	23.6507954
Poros	13	65.0500000	2.3825428
Inte	13	1.0000000	0
Ar	13	24.4807692	24.1842847
L	13	21.6000000	46.1788634
A	13	53.9192308	24.0166751
Text	13	5.6153846	38.1517711

**CLUSTER=2**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Coef. de variación</b>
Torc	13	6.3846154	28.0462502
ResP	13	540.3076923	9.7518414
Da	13	0.7800000	4.0878475
Dr	13	2.2823077	3.6882745
Lpla	13	13.7469231	24.8401987
Lliq	13	21.8992308	35.7632206
HumV	13	26.3384615	22.4084960
Poros	13	65.9169231	1.9848044
Inte	13	1.0000000	0
Ar	13	23.8961538	40.0547263
L	13	29.1076923	43.6014157
A	13	46.9961538	38.9442609
Text	13	4.8461538	51.8248499

**CLUSTER=3**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Coef. de variación</b>
Torc	14	6.0785714	33.7592946
ResP	14	326.2142857	26.5937709
Da	14	0.8192857	4.9165521
Dr	14	2.2185714	5.9347761
Lpla	14	15.2335714	20.3506320
Lliq	14	22.9100000	21.4992582
HumV	14	32.1285714	34.8253815
Poros	14	60.8235714	15.8292642
Inte	14	1.0714286	24.9443826
Ar	14	33.5357143	51.7134401
L	14	31.0285714	39.7425237
A	14	35.4357143	63.5030154
Text	14	4.0000000	58.8348405



### Anexo 9. Probabilidad posterior de miembro en cultivo (ACP)

Probabilidad posterior de miembro en Cultivo							
Obs	Desde Cultivo	Clasificado en Cultivo		ARROZ	CACAO	CAF	PALMA
1	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	ARROZ	PALMA	*	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
3	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	ARROZ	ARROZ		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	CACAO	CACAO		0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
14	CACAO	CACAO		0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
15	CACAO	CACAO		0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
16	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	CACAO	CAF	*	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
20	CACAO	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	CAF	CACAO	*	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
22	CAF	CAF		0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
23	CAF	CAF		0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
24	CAF	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	CAF	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	CAF	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	CAF	CAF		0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
28	CAF	CAF		0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
29	CAF	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	CAF	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Probabilidad posterior de miembro en Cultivo							
Obs	Desde Cultivo	Clasificado en Cultivo		ARROZ	CACAO	CAF	PALMA
31	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
32	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
33	PALMA	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
35	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
36	PALMA	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
38	PALMA	PALMA		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
39	PALMA	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	PALMA	ARROZ	*	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Anexo 10. Numero de observaciones y porcentaje clasificado en cultivo**

<b>Número de observaciones y porcentaje clasificado en Cultivo</b>					
<b>Desde Cultivo</b>	<b>ARROZ</b>	<b>CACAO</b>	<b>CAF</b>	<b>PALMA</b>	<b>Total</b>
<b>ARROZ</b>	9 90.00	0 0.00	0 0.00	1 10.00	10 100.00
<b>CACAO</b>	6 60.00	3 30.00	1 10.00	0 0.00	10 100.00
<b>CAF</b>	5 50.00	1 10.00	4 40.00	0 0.00	10 100.00
<b>PALMA</b>	4 40.00	0 0.00	0 0.00	6 60.00	10 100.00
<b>Total</b>	24 60.00	4 10.00	5 12.50	7 17.50	40 100.00
<b>Anteriores</b>	0.25	0.25	0.25	0.25	

**Anexo 11. Formato para medición de textura en laboratorio**

# muestra	Lectura a los 40 s			Lectura a las 2 horas		
	1 Lec Hidro	1 Temperatura	Hora inicial	2 Lec Hidro	2 Temperatura	Hora final
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

**Anexo 12. Formato para determinación de densidad real**

# muestra	W picn vacío	W picn + muestra	W picn +muestra +agua	W picn + agua
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

**Anexo 13. Formato para determinación de densidad aparente**

# muestra	W terrón sin parafina	W terrón con parafina	Volumen desplazado ml
<b>1</b>			
<b>2</b>			
<b>3</b>			
<b>4</b>			
<b>5</b>			
<b>6</b>			
<b>7</b>			
<b>8</b>			
<b>9</b>			
<b>10</b>			

**Anexo 14. Formato para determinar límite líquido**

# muestra	# golpes	W cápsula	W suelo húmedo	W suelo seco
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

**Anexo 15. Formato para determinar límite plástico**

# muestra	W cápsula	W húmedo + cap	W seco + cap
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			