

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR).

Tatiana Moreno Melo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2022

Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR).

Tatiana Moreno Melo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería de Biosistemas

Director (a):

Ing. Agr. M. Sc. Doctor Jesús Hernán Camacho Tamayo

Codirector (a):

Ing. Agr. M. Sc. Janeth González Nivia

Línea de Investigación:

Adecuación de Tierras y manejo Sostenibles

Grupo de Investigación:

Ingeniería de Biosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2022

“La mayor gloria no es vencer, sino levantarse cuando nos hemos caído”.

Nelson Mandela.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Tatiana Moreno Melo

Fecha: 12/01/2023

Agradecimientos

Decir gracias se ha convertido en costumbre, una palabra que nace y termina solo por el sonido de la voz de quien la pronuncia, realiza una seña o quien la escribe. Sin embargo, las combinaciones de estas 7 letras resumen de la mejor manera lo que se quiere expresar por aquel sentimiento sincero que refleja el bienestar recibido.

Siempre me sentiré muy agradecida principalmente con Dios por darme las herramientas necesarias para cumplir su promesa. Agradezco a mis padres Aideé y Gerardo, en especial a mi mamá, por estar en cada lucha y ser el soporte ante el decaimiento. Agradezco a mi tutor Jesús Hernán Camacho-Tamayo por brindarme la ayuda necesaria, al igual que a los docentes que estuvieron en este proceso de aprendizaje, hago mención especial al profesor Luis Carlos González Susatama por su ayuda y colaboración.

Agradezco a mi alma máter por ser mi casa y por poder desarrollar allí este proyecto, al prestarme el laboratorio de suelos del programa de Ingeniería Agrícola y el laboratorio de Geomática de Ciencias Agrarias a cargo de los docentes Yolanda Rubiano y Luis Joel, también a las entidades y personas de donde recibimos o tomamos las muestras aquí estudiadas: IGAC, CIAM, CENICAÑA, la Universidad del Norte, Centro de Investigación de Carimagua, bajo el muestreo de Felipe Fernández, Katherine Correa, muestras del Páramo de Guerrero y datos proporcionados por Diego Peña, entre otras muchas personas. También, a Alejandra Durán por su ayuda en el laboratorio.

Este trabajo sin duda es el reflejo de cada uno de ustedes y su apoyo.

Un sincero gracias.

Resumen

Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR).

Este estudio evaluó la textura de algunos suelos en Colombia mediante la técnica de la espectroscopia NIR, comparándola con métodos tradicionales de laboratorio. La espectroscopia NIR no es invasiva y evita el uso de químicos en la obtención de información del suelo; recurso vital para la biodiversidad. Inicialmente, se caracterizaron las muestras utilizando la cromatografía de Pfeiffer para comprender su relación con la materia orgánica, los microorganismos y los minerales presentes al recolectarlas. Posteriormente, se procesaron las muestras mediante la espectroscopia NIR; con las respuestas espectrales se reveló que, a una longitud de onda de 2000 nm, se identificaron contenidos de arcilla en 9 muestras de suelo provenientes de los departamentos del Cesar, Quindío, Cundinamarca, Meta y Atlántico. Los modelos de calibración utilizados para evaluar propiedades específicas del suelo (A, L, Ar, CO, Ca, Na, BT, Mg, pH) presentaron un coeficiente de determinación (R^2) > 0,6, a excepción del potasio (K) que obtuvo un R^2 de 0,4. Además, se compararon los métodos convencionales del hidrómetro y la pipeta en 100 muestras del departamento del Meta para determinar cuál era más preciso, los resultados de las correlaciones de Pearson indicaron una correlación nula para el limo (0,095) y una correlación moderada para la arena y la arcilla (0,3 y 0,5, respectivamente), lo que reveló deficiencias en la ejecución del método de la pipeta. En conclusión, la espectroscopia NIR demostró ser una técnica adecuada para evaluar la textura y otras propiedades del suelo obteniendo modelos aceptables pese a la cantidad de muestras.

Palabras clave: Interpretación de cromatogramas, método del hidrómetro, método de la Pipeta, longitudes de onda, potencialidad espectral.

Abstract

Spectral characterization of Colombian soils through near-infrared spectroscopy (NIR).

This study evaluated the texture of some soils in Colombia using the NIR spectroscopy technique, comparing it with traditional laboratory methods. NIR spectroscopy is non-invasive and avoids the use of chemicals in obtaining soil information, a vital resource for biodiversity. Initially, the samples were characterized using Pfeiffer chromatography to understand their relationship with organic matter, microorganisms, and minerals present during collection. Subsequently, the samples were processed using NIR spectroscopy; spectral responses revealed that clay contents were identified in 9 soil samples from the departments of Cesar, Quindío, Cundinamarca, Meta, and Atlántico at a wavelength of 2000 nm. The calibration models used to evaluate specific soil properties (A, L, Ar, CO, Ca, Na, BT, Mg, pH) showed a coefficient of determination (R^2) $> 0,6$, except for potassium (K), which obtained an R^2 of 0,4. Additionally, conventional methods of hydrometer and pipette were compared in 100 samples from the Meta department to determine which was more accurate, the results of Pearson correlations indicated no correlation for silt (0,095) and a moderate correlation for sand and clay (0,3 and 0,5, respectively), revealing deficiencies in the execution of the pipette method. In conclusion, NIR spectroscopy proved to be a suitable technique for evaluating soil texture and other properties, yielding acceptable models despite the limited number of samples.

Keywords: Interpretation of chromatograms, hydrometer method, Pipette method, wavelengths, spectral potential.

Contenido

	Pág.
Resumen	6
Lista de figuras	11
Lista de tablas	13
Lista de Símbolos y abreviaturas	14
1. Marco Conceptual	6
1.1 El suelo	6
1.2 La textura, propiedad física del suelo	6
1.3 Caracterización cualitativa de suelos a través de la Cromatografía de Pfeiffer	8
1.3.1 Interpretación del cromatograma	8
1.4 Análisis convencional para el estudio textural del suelo	11
1.5 La espectroscopia	12
1.6 La espectroscopia y el suelo	14
2. Metodología	18
2.1 Zona de estudio	19
2.2 Caracterización de las zonas - Cromatografía de Pfeiffer	23
2.3 Métodos de laboratorio convencionales para determinar textura en suelos	24
2.3.1 Método de Bouyoucos o del Hidrómetro	24
2.3.2 Método de la pipeta de Robinson	26
2.3.3 Análisis estadístico para métodos de laboratorio convencionales	27
2.4 Análisis cualitativo y cuantitativo NIR	27
3. Resultados	29
3.1 Caracterización cualitativa de las zonas de estudio - Cromatografía de Pfeiffer	29
3.2 Comparación entre los métodos de Bouyoucos y de la Pipeta	35

10 Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

3.3	Análisis textural para las zonas de estudio	39
3.4	Análisis NIR	46
3.4.1	Análisis cualitativo de las zonas de estudio a partir de firmas espectrales	46
3.4.2	Modelos de validación obtenidos para distintas propiedades del suelo en las zonas de estudio	51
4.	Conclusiones y recomendaciones	63
4.1	Conclusiones	63
4.2	Recomendaciones	64
	Bibliografía	78

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Sistemas de clasificación de las partículas minerales del suelo.	6
Figura 1-2. Zonas de un cromatograma de Pfeiffer.	7
Figura 1-3. Colores deseables (a) y no deseables (b).	8
Figura 1-4. Características de los cromas: a) Formas enzimáticas. b) Diferentes terminaciones de dientes.	9
Figura 1-5. Evolución radial del croma.	9
Figura 1-6. Curva espectral de un Oxisol con lecturas de propiedades del suelo con longitudes de onda Vis y NIR.	14
Figura 2-1. Metodología.	17
Figura 2-2. Elaboración de la cromatografía.	21
Figura 2-3. Elaboración del método del hidrómetro o de Bouyoucos.	22
Figura 3-1. Distribución de la zona central o de oxigenación.	27
Figura 3-2. Distribución de la zona interna o mineral.	28
Figura 3-3. Distribución de la zona intermedia o de Materia orgánica.	29
Figura 3-4. Distribución de la zona externa o enzimática.	30
Figura 3-5. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso de Arena_P Vs Arena_B.	32
Figura 3-6. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso del Limo_P Vs Limo_B.	33
Figura 3-7. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso del Arcilla_P Vs Arcilla_B.	33
Figura 3-8. Bandas de absorción en el Infrarrojo Cercano (NIR).	38
Figura 3-9. Un espectro de suelo (Haploxeralf) que representa los principales cromóforos en los suelos.	39
Figura 3-10. Espectros de minerales de suelo común con remoción del continuo.	39
Figura 3-11. Espectros de muestras de distintos suelos de Colombia.	40
Figura 3-12. Espectros de muestras de suelo del Cenicaña (a), Uribia- Maicao(b), Páramo de Guerrero(c), Bogotá (d), Belén de los Andaquíes (e), Barranquilla (f), Cajicá(g), Ponedera (h), CIAM (i), Espinal (j), Carimagua (k).	41
Figura 3-13. Loadings de las propiedades Arena, Limo y Arcilla con el primer componente principal (CPA-1).	45

Figura 3-14. Loadings de las propiedades Carbono Orgánico (CO), pH, Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na), Bases Totales (BT) con el primer componente principal. 46

Figura 3-15. Valores estimados Vs Valores medidos de cada propiedad del suelo. 49

Lista de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 2-1. Mapa de las zonas de estudio.	22
Ilustración 3-1. Zonas de muestreo, grupos texturales.....	44

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Zonas de estudio.	18
Tabla 3-1. Estadística descriptiva de las 100 muestras tratadas bajo los métodos de Bouyoucos y Pipeta.	31
Tabla 3-2. Correlación de Pearson para los métodos de Bouyoucos y Pipeta.	32
Tabla 3-3. Ecuaciones de regresión y coeficientes de determinación para cada propiedad.	34
Tabla 3-4. Resumen clase textural en zonas de estudio.	36
Tabla 3-5. Estadística descriptiva para distintas propiedades de las zonas de estudio.	42
Tabla 3-6. Modelos de validación obtenidos para cada propiedad.	44

Lista de Símbolos y abreviaturas

Propiedades

Símbolo	Término	Unidad
<i>A</i>	Arena	
<i>L</i>	Limo	
<i>Ar</i>	Arcilla	
<i>A_B, L_B, Ar_B</i>	Arena, Limo, y arcilla método de Bouyoucos	
<i>A_P, L_P, Ar_P</i>	Arena, Limo, y arcilla método de Pipeta	
CO	Carbono Orgánico	
pH	Potencial de hidrogeno	
Ca	Calcio	cmol (+) /kg
Mg	Magnesio	cmol (+) /kg
K	Potasio	cmol (+) /kg
Na	Sodio	cmol (+) /kg
BT	Bases Totales	cmol (+) /kg

Símbolos

Símbolo	Término
<i>nm</i>	Nanómetro
<i>cm</i>	Centímetro
<i>ml</i>	Mililitro
<i>h</i>	Hora
<i>s</i>	Segundo
<i>msnm</i>	Metro sobre el nivel del mar
R^2	Coefficiente de determinación
\bar{x}	Media
%	Porcentaje

Superíndices

Superíndice	Término
2	Cuadrado

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>NIR</i>	Near Infra Red – Espectroscopia de Infrarrojo cercano
<i>VIS</i>	Espectroscopia de Infrarrojo Visible
<i>SD</i>	Desviación estándar
<i>CV</i>	Coefficiente de variación
<i>Med.</i>	Mediana
<i>Max.</i>	Máximo
<i>Min.</i>	Mínimo
<i>PLSR</i>	Regresión de mínimos cuadrados
<i>PCA</i>	Análisis de Componentes Principales
<i>MO</i>	Materia Orgánica
<i>RMSE</i>	Raíz del error medio cuadrático
<i>ME</i>	Error medio
<i>SDE</i>	Desviación estándar del error
<i>RPD</i>	Desviación residual de la predicción

Introducción

Los suelos se han formado por medio de rocas y materiales transportados, los cuales han estado expuestos a procesos de transformación, junto con la acción de los factores medioambientales que son decisivos para su creación (Mantilla et al., 1998). El suelo es un componente en sinergia natural, este ofrece soporte y sustento para las plantas y cultivos, ayuda a regular dinámicas biológicas, químicas y físicas en el ambiente, además cumple funciones importantes para el paso del agua, y en la biodiversidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales [IDEAM], 1999).

El suelo es motivo de investigación para distintos sectores académicos y no académicos, siendo tan importante como cualquier otro componente por su interacción y complejidad en los biosistemas, ya que puede presentar variantes dependiendo de la zona geográfica, las transformaciones antrópicas y otros factores para el desarrollo de la vida.

El sistema de información ambiental de Colombia - SIAC (s.f.) menciona que: “en este país hay una gran diversidad de suelos, en donde se encuentran 11 de los 12 órdenes de suelos existentes en el mundo”, también reporta que entre las causas de pérdida de este recurso y la gestión insostenible se tienen la creciente demanda de bienes y servicios, y el desconocimiento de las funciones e importancia de este.

El suelo es uno de los materiales que se pueden interpretar a través de los sentidos, sin embargo, es importante implementar técnicas y tecnologías apropiadas para conocer el funcionamiento interno, evaluando propiedades físicas, químicas y biológicas que permiten generar estrategias para su cuidado y uso adecuado (Zúñiga et al., 2018). Hoy en día, ha aumentado el interés en conocer las propiedades del suelo de forma rápida y económica, esto permite que se pueda tener la información disponible y de forma inmediata para los productores e investigadores, con el fin de usar estrategias de mejora para el manejo de suelos basándose en dichas propiedades y funciones (Macias et al., 2015).

Por ello, se debe interpretar las propiedades de los suelos a través de análisis apropiados y así poder tomar las decisiones adecuadas para su protección y productividad, conocer las características físicas, químicas y biológicas del suelo es trascendental para determinar su interacción con el ambiente. En este estudio se tendrá en cuenta la textura del suelo como objetivo principal, sin embargo, las propiedades físicas del suelo son muchas más como la estructura, porosidad, color, consistencia, entre otras, que influyen entre sí (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura [FAO], 2020).

A través de la textura del suelo se puede establecer una orientación acerca de la fertilidad, capacidad de retención de agua y contenido de materia orgánica. Esta propiedad física indica la proporción de partículas del suelo como arena, limo y arcilla, que suelen ser agrupadas en suelos de textura gruesa, media y fina (Delgadillo y Martínez, 2010).

El análisis granulométrico es el proceso más común para el estudio de las propiedades de los suelos, la evaluación de la textura se puede hacer por varios métodos, existe la determinación organoléptica; la cual da resultados de las cualidades de este material, y los métodos usados en laboratorios que dan un resultado cuantitativo con un grado más alto de precisión. Algunos de los anteriores métodos son el tamizado para determinar suelos de grano grueso (arenas), las pruebas de hidrómetro (Bouyoucos) y de pipeta de Robinson para suelo de grano fino (limos y arcillas), estableciendo dicha proporción por sedimentación (Moreno y Márquez, 2018).

En la actualidad, la utilización de técnicas convencionales de laboratorio es muy común, y aunque estas han sido de ayuda para dar resultados apropiados, la desventaja consiste que para llegar a estos se usan sustancias contaminantes, además de ser prácticas dispendiosas, algunas costosas y de alto esfuerzo (Sagredo, 2014), incluso con gran desperdicio de agua. Se han desarrollado estudios de suelos desde hace muchos años, no obstante, hay lugares que aún falta por estudiar y por determinar las particularidades de dichos ambientes con un mayor detalle, por ello, diferentes disciplinas están en constante búsqueda de nuevas estrategias para la solución de estas necesidades.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 2020, el cálculo de las propiedades del suelo requiere técnicas de laboratorio

tradicionales y métodos de muestreo precisos. Sin embargo, se han observado diferencias significativas en los resultados obtenidos en laboratorios convencionales. Por esta razón, existe un creciente interés en buscar otras técnicas y métodos automatizados, como el uso de la espectroscopia. Esta técnica permite la medición uniforme de un número de propiedades en una gran cantidad de muestras, siendo económica, tecnológicamente avanzada y no invasiva.

La espectroscopia, como una reciente técnica aporta nuevos conocimientos y resultados más eficaces en comparación a las del laboratorio tradicional. A pesar de que estas nuevas estrategias presentan un alto grado de desarrollo y precisión, sigue en etapa de crecimiento. Cuando se utiliza en un suelo, los resultados están ligados a muchas variaciones como la toma de la muestra, el lugar de interés, sus condiciones medioambientales, junto con el contexto del objeto de estudio (Rodríguez, 2015), por lo que aplicando las estrategias y análisis estadísticos adecuados se podría garantizar una técnica amplia para ser utilizada en suelos en Colombia y el mundo, además de ayudar a la protección de este recurso.

La espectroscopía se fortalece por medio de técnicas como la estadística multivariada y la geoestadística, lo cual proporciona una alternativa adecuada para el estudio de las características del suelo, la variabilidad espacial de dichas propiedades, y el desarrollo de los cultivos (Camacho-Tamayo, 2013). Sin embargo, estos atributos no se comportan igual, las propiedades químicas del suelo tienen mayor variabilidad espacial que las propiedades físicas, ya que estas dependen del manejo del terreno entre otras condiciones (Rodríguez, 2015).

Esta técnica también se puede interpretar de forma cualitativa a través de las respuestas espectrales, es por ello que el espectro electromagnético se puede dividir en distintas categorías en función de la longitud de onda, por lo que, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) - en la que se centrará este estudio - permite una rápida adquisición de la información de distintas variables del suelo (Ca- Calcio, Mg- Magnesio, K- Potasio, Al- Aluminio, CIC- Cambio de intercambio catiónico, N- Sodio, C- Carbono, MO- materia orgánica, A- arena, L- limo, Ar- arcilla, mineralogía, entre otras) como lo menciona Camacho-Tamayo (2013). Al asociar los datos obtenidos del espectro con el uso de

análisis quimiométrico se han logrado apreciaciones de medidas edáficas con alto grado de certeza, con lo que se generan estrategias de laboratorio con conciencia ambiental (Rodríguez, García et al., 2016).

Esta técnica es relevante debido a que a través de estos análisis es posible obtener información sobre la fertilidad y otras propiedades del suelo en Colombia. La espectroscopia se destaca por su versatilidad, bajo costo, capacidad de reproducción y su contribución a la preservación de este recurso vital. En este sentido, la Red Mundial de Laboratorios de Suelos (GLOSOLAN) y otras instituciones internacionales están llevando a cabo investigaciones utilizando esta técnica, con el objetivo de garantizar la salud del suelo, combatir la degradación de la tierra y promover una vigilancia constante de los suelos. Además, se busca fomentar la colaboración internacional en este campo (FAO, 2020).

A través de estudios como el de Gámez (2019), Carranza (2019), Perret et al., (2020), donde por medio de métodos de análisis de la espectroscopia se evalúan propiedades del suelo como el carbono orgánico, contenido de agua, composición mineral y contenido de nutrientes en distintos lugares de Colombia y Costa Rica, obteniendo modelos que estiman estas propiedades en los dos primeros casos de estudios, en el caso de Perret et al., (2020) el propósito fue crear bibliotecas espectrales. En los tres estudios, se llegó a la conclusión de la eficacia de este método para predecir dichas propiedades, además de mostrar que esta técnica con un apoyo estadístico adecuado como el uso del método de mínimos cuadrados parciales (parcial least squares regression - PLSR) genera los resultados con mayor confiabilidad.

En Colombia y en el mundo, se han llevado a cabo numerosas investigaciones que estudian las propiedades del suelo utilizando la espectroscopia, abarcando diferentes rangos de longitud de onda, como el visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (MIR). Entre estas investigaciones, se ha prestado especial atención al estudio de la textura del suelo. Sin embargo, hasta ahora los estudios realizados en Colombia se han centrado en áreas geográficas específicas del país.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el potencial de la espectroscopia para el análisis de muestras de suelo provenientes de diversas regiones de Colombia. Al abordar diferentes ubicaciones geográficas, esta investigación busca proporcionar una visión más completa y representativa de las propiedades del suelo en el país.

El impacto de esta investigación puede ser significativo, ya que contribuirá al conocimiento y comprensión de los suelos colombianos, un recurso de vital importancia para la agricultura y el medio ambiente. Además, los resultados obtenidos podrán servir como base para futuros estudios y contribuir al desarrollo de prácticas de manejo de suelos más eficientes y sostenibles en diferentes regiones del país.

Por lo anterior, es que este estudio tiene los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Evaluar la textura de distintos suelos de Colombia a través de la espectroscopia infrarroja cercana (NIR), comparándola con métodos convencionales de laboratorio.

Objetivos específicos:

- Caracterizar diferentes clases de suelos a través de las respuestas espectrales.
- Evaluar la capacidad de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) para la estimación de algunas propiedades del suelo que se encuentran bajo estudio.
- Analizar el potencial de la respuesta espectral para determinar el contenido de arena, limo y arcilla del suelo.

1. Marco Conceptual

1.1 El suelo

El suelo es el medio natural para el progreso de la vida vegetal (FAO, 2020), sin embargo, este es un organismo que comprende a sólidos como minerales y materia orgánica, líquidos y gases que se encuentran en la superficie terrestre, que ocupa un espacio y que se caracteriza por tener horizontes que se distinguen del material parental como resultado de adiciones o pérdidas de energía y materia (Soil Survey Staff, 2014). El suelo tiene un papel importante en el desarrollo de la biodiversidad, siendo parte de los ecosistemas y agroecosistemas, este sirve como eje articulador de la vegetación, el clima, la sociedad, entre otros trascendentales actores. Si bien se tiene la idea que el suelo es el soporte y suministro de nutrientes para las plantas, y que de este depende la producción de alimentos, se desconoce que el suelo es el lugar donde se desarrollan los ciclos biogeoquímicos, sin estos vitales ciclos para los ecosistemas los elementos químicos presentes en el suelo no tendrían las condiciones adecuadas para ser aprovechables, al igual que ocurre con el almacenamiento o la fijación del carbono (Burbano-Orjuela, 2016).

Al igual que en lo anterior, la FAO (2020) menciona que el suelo es un componente esencial de la "Tierra" y " los Ecosistemas", y que ambos conceptos se relacionan con la vegetación, el agua y el clima, además que también tiene consideraciones importantes en el ámbito socioeconómico.

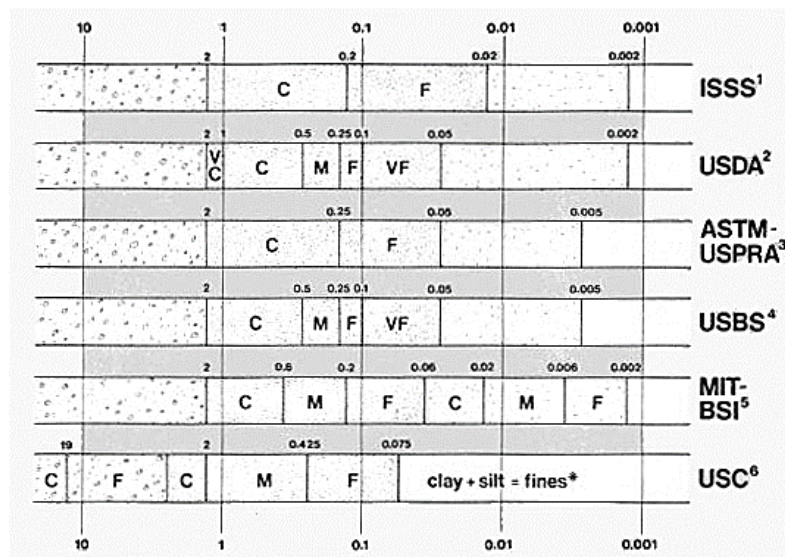
1.2 La textura, propiedad física del suelo

La textura es uno de los atributos más estables del suelo, esta puede ser modificada por prácticas agrícolas que causan la mezcla de las diferentes capas del suelo (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 1999). La textura del suelo es una de las características físicas más importantes, pues a través de ella se puede predecir el

comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes. Esta propiedad indica la proporción de partículas fundamentales en el suelo: arcilla, limo y arena (Delgadillo y Martínez, 2010).

En el mundo hay varios organismos que clasifican estas partículas, sin embargo, todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para cada clase, las escalas más usadas son la de Atterberg o Internacional (ISSS) y la americana del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), Figura 1-1.

Figura 1-1. Sistemas de clasificación de las partículas minerales del suelo.



Fuente: FAO, Generalidades del suelo - Página web.

En el triángulo textural se presentan todas las combinaciones posibles y el porcentaje de cada partícula define el tipo de textura, definida por la influencia de cada uno de los tamaños de las partículas contenidas. Las más gruesas son las arenas (0,05 – 2 mm), las medianas son los limos (0,002- 0,05 mm) y las más pequeñas son las arcillas (< 0,002 mm) (Ciancaglini- Prosap, s.f.).

1.3 Caracterización cualitativa de suelos a través de la Cromatografía de Pfeiffer

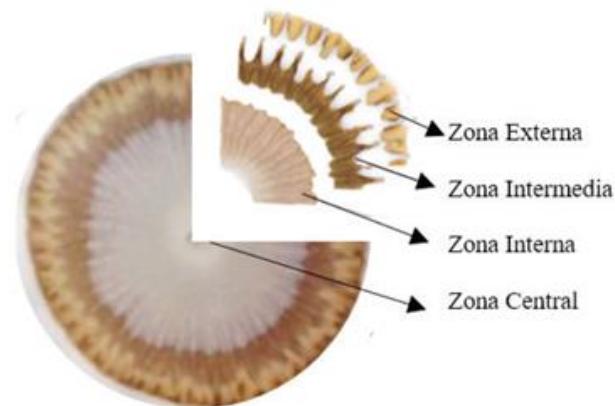
La **cromatografía de Pfeiffer** es una técnica de análisis cualitativo, en esta es posible observar la relación que se guarda entre materia orgánica, microorganismos o microbiología y minerales (Medina et al., 2018). A través de esta técnica se permite la separación de componentes debido a la influencia de dos efectos contrapuestos, la retención y el desplazamiento, esto llevado a cabo por la reacción de los reactivos con las propiedades de la muestra. Se puede lograr dar una interpretación por medio de las formas, colores y la integración entre zonas (Heifer internacional, 2014).

1.3.1 Interpretación del cromatograma

Una vez se cuenta con la cromatografía revelada, se distinguen 4 zonas de interés para el estudio (Figura 1-2). Se debe tener en cuenta que con esta técnica pueden variar el tamaño, la forma, los colores y la armonía o integración de las zonas. Restrepo y Piñeiro (2011), mencionan las siguientes definiciones para cada zona:

- Zona central (Z1): Zona de oxigenación o de estructura del suelo.
- Zona interna (Z2): Zona de presencia de minerales.
- Zona intermedia (Z3): Zona de materia orgánica.
- Zona externa (Z4): Zona enzimática o de presencia de humus.
- Zona periférica o de marcación: En esta zona se colocan los datos de la muestra.

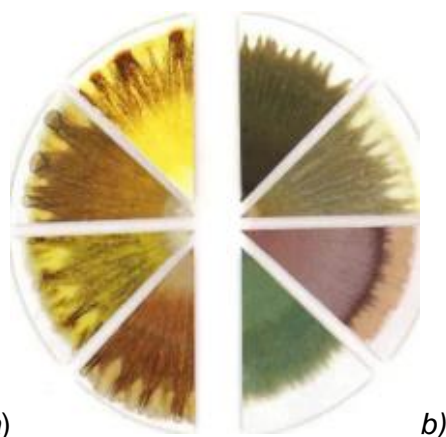
Figura 1-2. Zonas de un cromatograma de Pfeiffer.



Fuente: Restrepo y Piñero, 2011.

La interacción de cada una de las zonas mencionadas debe integrarse con la siguiente, indicando la unión de los componentes mencionados hasta llegar a la zona externa donde se resalta todo el proceso de humificación, ya que esto ocurre por la presencia de componentes minerales, materia orgánica y microbiología (Abad, 2018). En un suelo sano, los colores son de tonos dorados, amarillos, cafés claros (Restrepo y Piñero, 2011). Por otro lado, en suelos destruidos y/o contaminados, se tienen colores oscuros, negros, grises, verdes oscuros, y no se integran las zonas del cromatograma pues se muestran claramente divididos (Figura 1-3).

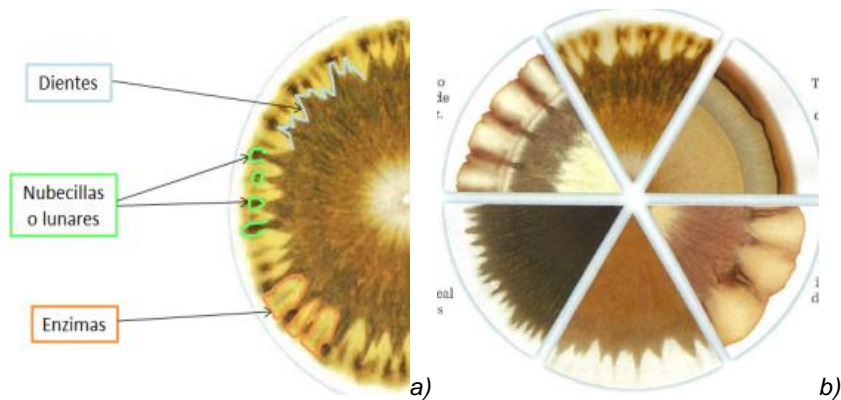
Figura 1-3. Colores deseables (a) y no deseables (b).



Fuente: Restrepo y Piñero (2011).

Las cromatografías también pueden variar sus formas en la zona enzimática, presentando nubecillas, lunares o dientes (Figura 1-4, A). Si estas zonas presentan colores oscuros y puntas agudas en lugar de dientes, se indica una condición no deseable para el suelo. En la Figura 1-4, b; se presentan las distintas terminaciones de un cromatograma, donde para una terminación ideal se tiene forma de explosión y lunares enzimáticos. En cuanto a las terminaciones no ideales se tienen las formas planas, circulares y sin bordes. Al igual que cuando se presentan figuras simulando dientes de caballo, dientes puntiagudos, agujas irregulares, o granos de maíz.

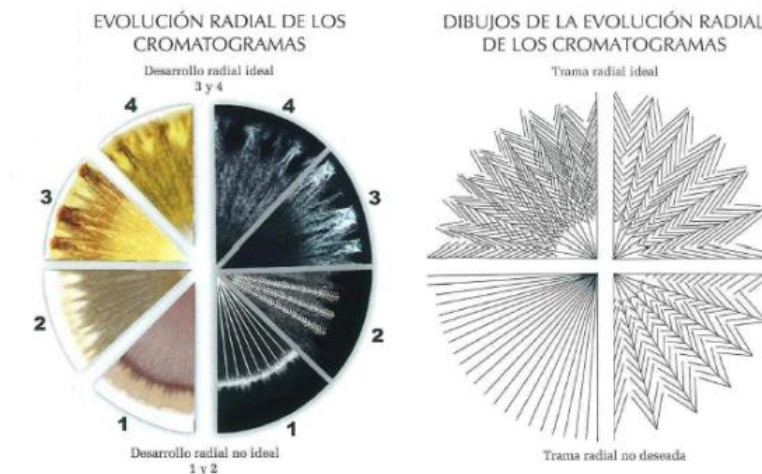
Figura 1-4. Características de los cromas: a) Formas enzimáticas. b) Diferentes terminaciones de dientes.



Fuente: Interpretar la cromatografía de suelos - Sitio Web.

A parte de los colores y las formas en la Z4 (enzimática), se debe tener en cuenta la evolución radial, la cual indica la integración de los componentes del suelo, en la Figura 1-5, se determinan las distintas formas que puede tomar los caminos tanto ideales como no ideales, la evolución radial ideal se caracteriza por parecer plumas. Si los cromas producen en la parte externa algo similar a una explosión con presencia de nubecillas o lunares de color café claro y de distintos tamaños, se puede indicar que es un buen suelo. Por el contrario, cuando no hay radiación y los colores son oscuros son suelos destruidos, compactados y sin ninguna estructura, también se podría pensar que hay un uso inadecuado de fertilizantes químicos.

Figura 1-5. Evolución radial del croma.



Fuente: Restrepo y Piñero (2011).

1.4 Análisis convencional para el estudio textural del suelo

Existe una amplia serie de métodos tanto tradicionales como modernos, que permiten llevar a cabo el análisis de textura en suelo, están los cualitativos y cuantitativos. Los métodos tradicionales más conocidos para el análisis textural son el tamizado, pipeta e hidrómetro, pero de estos tres, este último es el que se emplea con mayor regularidad en laboratorios (Moreno y Márquez, 2018).

El **tamizado** consiste en la separación de grupos de partículas mediante la utilización de juegos de tamices con aberturas de tamaño progresivamente menores, se parte de un peso conocido de muestra, luego se pesan las porciones que quedan retenidas en los tamices usados, obteniéndose el porcentaje correspondiente a cada tamiz sobre el peso total inicial de la muestra (Correal et al., 2019).

La prueba de Bouyoucos o del Hidrómetro, consiste en mezclar el suelo con una solución dispersante (hexametáfosfato de sodio- $(\text{NaPO}_3)_6$) mediante agitación por dos horas, aprovechando las diferentes velocidades de sedimentación de las partículas, se determina el porcentaje de gránulos por medio del cambio de densidad de la solución en la cual se lleva a cabo el ensayo (Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA], 2017).

El método de la pipeta de Robinson, al igual que el laboratorio de Bouyoucos está basado en la ley de Stokes, es decir en la diferencia de velocidad de sedimentación de partículas de distinto diámetro, con el fin de analizar las extracciones a profundidades y tiempos determinados, que supone la eliminación por sedimentación de todas las partículas mayores a un diámetro x (Moreno y Márquez, 2018). Mientras que en el método de Bouyoucos las muestras de suelo no se someten a un pretratamiento para eliminar la materia orgánica y las sales solubles, el método de la pipeta demanda la eliminación total de estas unidades (Norambuena et al., 2002).

1.5 La espectroscopia

Los métodos espectroscópicos permiten realizar análisis que sirven para identificar y medir propiedades tanto elementales, como orgánicas e inorgánicas, en diversas y variadas muestras. La espectroscopia es la herramienta más utilizada en investigación, análisis, control y diagnóstico en muchos sectores (González y Montaña, 2015).

La espectroscopia es una técnica que permite estudiar cómo la radiación electromagnética interactúa con la materia, debido a la absorción de las uniones atómicas en las ondas empleadas. El uso de la espectroscopia en la caracterización de suelos ha sido de gran importancia por su rapidez y eficacia, en esta práctica no se requiere preparación de la muestra, la muestra puede ser sólida, líquida, pastosa, en suspensión o gaseosa, y el análisis puede ser cualitativo y cuantitativo (Castorena-García et al., 2011).

La espectrometría infrarroja (IR) se basa en que los enlaces de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, a partir de la energía emitida por las oscilaciones de estos enlaces, se determina el o los elementos contenidos en las muestras estudiadas

(González y Montaña, 2015). La espectroscopia de reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) ha alcanzado un gran desarrollo a nivel mundial por su exactitud, además por ser una técnica que no destruye ni contamina el ambiente, esta permite analizar de forma rápida y relativamente fácil un gran número de muestras, pudiendo ser automatizada (Valenciaga y Simoes, 2006).

El espectrómetro mide una luz dispersa que incide a través de la muestra de estudio, en donde un conjunto de fotones puede transmitirse y el resto se absorbe o se refleja (Alomar y Fuchslocher, 1998), obteniendo un espectro de reflectancia - NIRS. A través del cual se pueden determinar las propiedades fisicoquímicas sin destruir la muestra ni usar químicos contaminantes. Las firmas espectrales muestran bandas que son típicas de grupos funcionales particulares y que tienen localizaciones e intensidades específicas dentro de los espectros infrarrojos (Gómez y Murillo, s.f.). La espectroscopia infrarroja se usa como "huella dactilar" en la identificación de muestras desconocidas a través de la comparación de espectros de referencia (Aparicio et al., 2012).

La espectroscopia de infrarrojo cercano - NIR, es una técnica que ha tenido grandes avances desde el siglo XI, haciendo uso de forma natural del espectro electromagnético. La región NIR es el área del espectro definida por longitudes de onda entre 700 nm y 2500 nm es la primera región del espectro que presenta bandas de absorción relacionadas con las vibraciones moleculares (Martelo, 2014, pág. 65).

La absorción de energía que obtiene la muestra produce que los enlaces entre Carbono e Hidrógeno (C-H), Oxígeno e Hidrógeno (O-H) y Nitrógeno e Hidrógeno (N-H), entre otros (S-H, C=O), ya que son los principales constituyentes de la estructura básica de las sustancias orgánicas y vibran en formas distintas (Cozzolino, 2002; Guerrero et al., 2008, Carranza, 2019). Esto determina que, para un material, el espectro obtenido en la región del infrarrojo cercano sea una combinación de bandas de absorciones superpuestas o muy cercanas, que suelen confundirse en una línea suavizada, en que se encuentran picos, valles y curvaturas (Cozzolino, 2002). Los picos que aparecen en un espectrograma jamás son infinitamente delgados (Gómez y Murillo, s.f.).

De acuerdo con Valenciaga & Simoes (2006), una de las ventajas del trabajo en la región NIR es que, al utilizar longitudes de ondas menores con relación al infrarrojo medio la penetración de la radiación es mayor, debido a que el grado de absorción es más débil.

1.6 La espectroscopia y el suelo

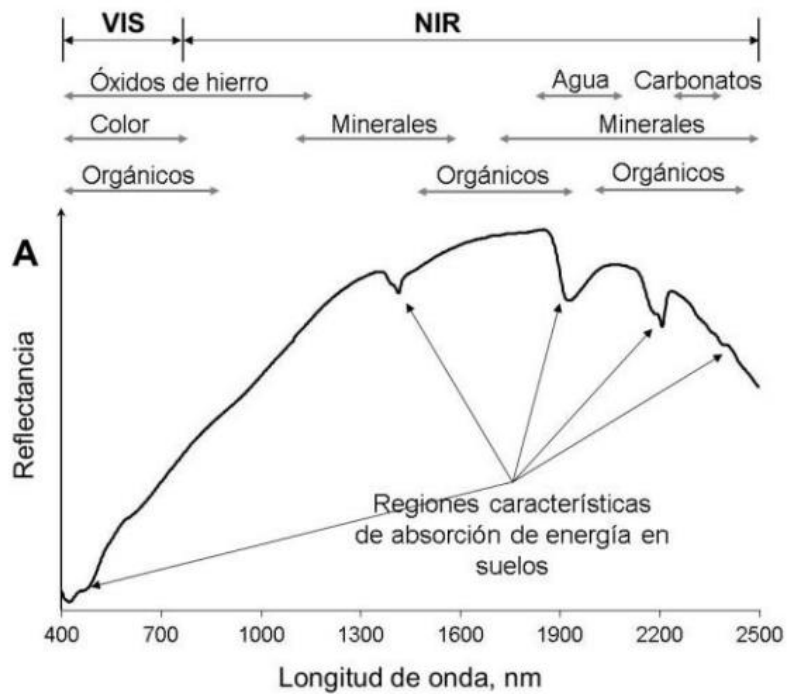
La espectroscopía de reflectancia estudia la energía que refleja un cuerpo, como parte de la descomposición de la energía que incide, en función de la longitud de onda. Esta técnica presenta un alto grado de avance, junto con herramientas estadísticas, se puede relacionar de una forma más precisa la variabilidad del espectro con la variabilidad de las características del suelo, lo novedoso de esta tecnología es que un único espectro permite caracterizar simultáneamente diversas propiedades del suelo (Camacho-Tamayo, 2013).

Las técnicas pedométricas del estudio espectral del suelo se han basado en la quimiometría, desarrollada en los años 1970, cuyo progreso se relaciona con el perfeccionamiento de instrumentales computacionales (Gutiérrez, 2010). La quimiometría utiliza métodos matemáticos y estadísticos para trazar o seleccionar procedimientos de medida o experimentos a través del análisis de datos, siendo una fuente importante de metodologías para la parametrización espectral de suelos (Camacho-Tamayo, 2013).

Los espectros se pueden caracterizar de forma cuantitativa mediante análisis e interpretación de resultados, realizando acercamientos estadísticos, procesando modelos de validación y calibración para predecir compuestos de las muestras. A partir de los espectros se pueden inferir las estructuras moleculares. Para ello, se requiere un modelo en el cual basar los cálculos (Gómez y Murillo, s.f.). El espectro también se puede caracterizar de forma cualitativa, a través de la información que brindan las respuestas espectrales, a partir de sus picos máximos y mínimos, así como de las curvaturas. El modo de reconocer un espectro de un compuesto dado es fácilmente llevado a cabo por simple comparación con espectros patrones ya registrados del mismo compuesto. La frecuencia a la que aparecen las bandas es característica de los diversos modos de vibración de las moléculas del suelo.

En la Figura 1-6, se muestra una curva espectral para el suelo oxisol de la altillanura de Colombia, en la cual se presentan distintas propiedades expresadas a través de las curvas de reflectancia en distintas longitudes de onda, espectroscopia Visible y cercana (Vis - NIR). En las longitudes de onda entre 1200 nm - 1600 nm y 1800 nm - 2500 nm se pueden detectar picos de minerales. Entre 1400 nm – 1500 nm y 2000 nm - 2500 nm material orgánico, alrededor de los 1900 nm grupos O-H (Alomar y Fuchslocher, 1998) y en la longitud de onda de 2300 nm aproximadamente contenido de carbonatos.

Figura 1-6. Curva espectral de un Oxisol con lecturas de propiedades del suelo con longitudes de onda Vis y NIR.



Fuente: Camacho-Tamayo, 2013.

Para estimar las propiedades de una muestra por espectroscopia se debe hacer calibraciones, proceso que requiere un conjunto de muestras representativas de la población obteniendo sus espectros. Posteriormente se debe analizar las muestras mediante un método de referencia, así como el desarrollo de las ecuaciones de calibración para relacionar dichos atributos (Camacho-Tamayo, 2013). Las ecuaciones de calibración

tienden a poseer mejor valor predictivo cuando se desarrollan en muestras relativamente homogéneas (Valenciaga y Simoes, 2006). Finalmente, se valida con otras muestras de la misma población, que no pertenezcan al conjunto de calibración para poder comparar y determinar la eficacia del método.

Camacho-Tamayo et al., (2017), mencionan en el caso del estudio de los suelos de Carimagua, que se encontró la presencia de minerales como el cuarzo que resultan insensibles ante esta técnica, arrojando resultados poco precisos para la fracción arena y limo en todos los horizontes. En este estudio también se interactuó con contenidos de humedad diferentes, lo que ayuda a la predicción de contenido de arcilla de un oxisol, ya que son atributos que se relacionan y se reflejan en la longitud de onda entre 1800 a 2000 nm, así como las características de absorción en la relación que se encuentra en los óxidos de hierro en la región visible (Viscarra-Rossel et al., 2009). En aquella investigación indican que los análisis de laboratorio se pueden sustituir en gran parte por los modelos espectrales por su evaluación y resultados eficaces que se pueden obtener (Camacho-Tamayo, 2017).

Cuando en este tipo de investigaciones se generan diferentes calibraciones y curvas espectrales, se pueden producir las librerías espectrales para identificar diferentes tipos de suelo, como fue relacionado por Bastidas y Carbonell (2010), autores que buscaban cuantificar la presencia de minerales arcillosos en suelos del valle geográfico del río Cauca, mediante un análisis de conglomerados y la selección de muestras homogéneas de cada subgrupo taxonómico para construir el perfil espectral. En este caso se usaron longitudes de onda a los 1.400 nm, 1.900nm y 2.200 nm, y a través de este estudio se pueden definir perfiles espectrales para el desarrollo de las librerías.

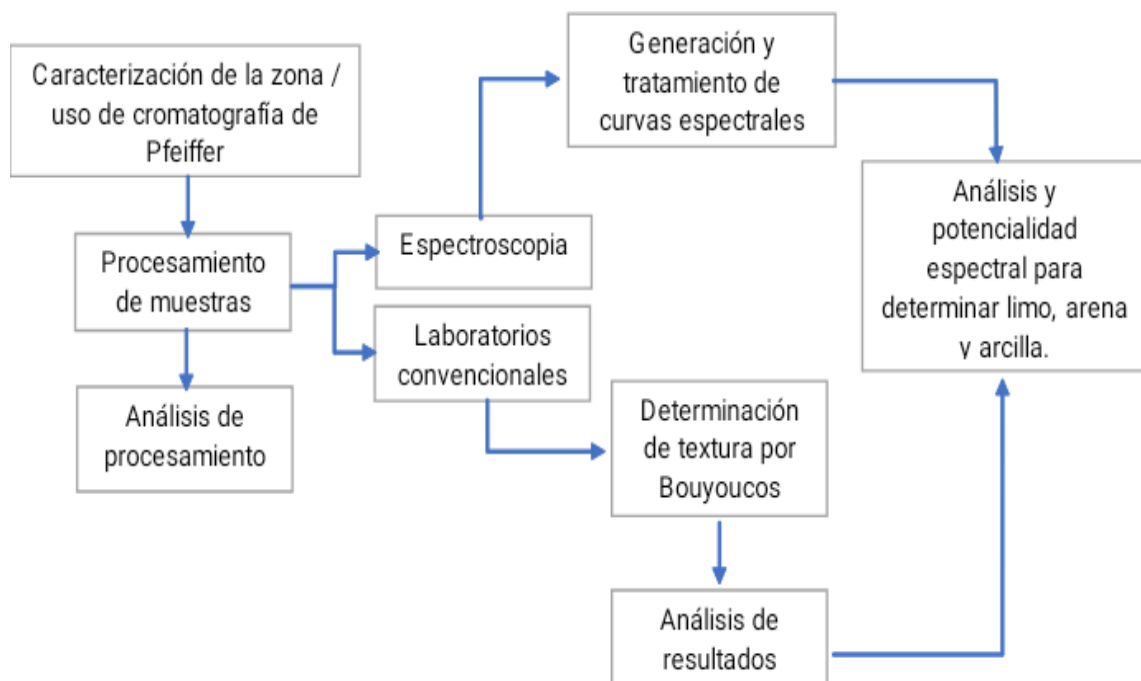
Sin embargo, en el estudio Souza et al., (2020) para la estimación de la disponibilidad de fósforo bajo esta técnica de espectroscopia se encontraron limitaciones cuando solo se quiere aislar una única variable, lo que hace que no se estime este parámetro de forma exitosa, además se debe tener en cuenta que allí mencionan que los suelos de estudio arrojaron contenidos nutricionales bajos, también concluyen que se podría trabajar bajo clases de disponibilidad para fertilización, ya que es una técnica prometedora.

En otros estudios como el de Coblinski, J et al., (2020), se predicen las clases de textura del suelo a través de diferentes regiones de longitudes de onda de la espectroscopia de reflectancia a varias profundidades del suelo para el Estado de Rio Grande do Sul (Brasil), en la metodología se aplicó el algoritmo de regresión cubista para los modelos predictivos, en dicho estudio se concluye que la combinación de las profundidades condujo a una predicción más precisa en comparación con las profundidades subdivididas del suelo, ya que la variabilidad de los datos es mayor. También, se concluye que a través de la calibración MIR se obtuvo la mejor precisión y que están relacionadas con la mineralogía de los suelos, especialmente con la caolinita.

2. Metodología

En la figura 2-1, se determinó la guía para llevar a cabo este estudio, en los siguientes subíndices se abordará el procesamiento para cada caso.

Figura 2-1. Metodología.



Fuente: Propia.

2.1 Zona de estudio

Las muestras acá valoradas fueron donadas por terceros como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el centro de investigación del Valle del Cauca (Cenicaña), Universidad del Norte, entre otras instituciones y particulares, además se tomaron muestras que se encontraban en el laboratorio de suelos del programa de Ingeniería Agrícola como las del Centro de Investigación Carimagua ubicada en Puerto Gaitán (Meta). La mayoría de estas se encontraban secas y tamizadas, y las muestras que no se encontraban bajo estas condiciones se secaron a temperatura ambiente, para luego tamizarlas con el tamiz de 2 mm. Con lo anterior, se puede inferir que no se realizó un muestreo propio, lo que apunta a que las condiciones del método de muestreo pueden ser diferentes para cada caso, incluyendo la profundidad de toma de esta y los periodos de recolección.

La experimentación fue llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia- sede Bogotá, en los años del 2020 al 2022, en la facultad de Ciencias Agrarias e Ingeniería. Se debe mencionar que al haber iniciado el procesamiento de muestras durante la pandemia esto alargó el plazo de obtención de resultados, lo cual fue un factor limitante en el procesamiento de las muestras, en especial con los métodos de laboratorio convencional; ya que estos tardan más en su ejecución.

Estas muestras de suelo se caracterizan por tener diferentes orígenes, en la Tabla 2-1, se describen algunas generalidades.

Tabla 2-1. Zonas de estudio.

Localización	Latitud/Longitud	Altura media	Clima promedio	Número de muestras
Centro de Investigación Carimagua. Puerto Gaitán (Meta)	4°34'01.6"N 71°19'58.0"W	170 msnm	Temperatura: 31°C Viento: 18 km/h Humedad: 59%	100
Centro Agropecuario "La Granja" Espinal (Tolima)	4°10'17.6"N 74°55'44.4"W	312 msnm	Temperatura: 25°C	20

20 Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

			Viento: 18 km/h Humedad: 59%	
Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CIAM). Mosquera (Cundinamarca)	4°42'52.0"N 74°12'60.0"W	2516 msnm	Temperatura: 13 °C Viento: 8 km/h Humedad: 68%	20
Ponedera (Atlántico)	10°38'31"N 74°45'11"W	15 msnm	Temperatura: 30 °C Viento: 10 km/h Humedad: 76%	15
Barranquilla (Atlántico)	10°57'50"N 74°47'47"W	18 msnm	Temperatura: 29 °C Viento: 5 km/h Humedad: 75%	15
Cajicá (Cundinamarca)	4°55'00"N 74°01'30"W	2558 msnm	Temperatura: 20 °C Viento: 13 km/h Humedad: 54%	14
Belén de los Andaquíes (Caquetá)	1°24'59"N 75°52'22"W	320msnm	Temperatura: 27 °C Viento: 6 km/h Humedad: 62%	15
Bogotá (Bogotá)	4°36'35"N 74°04'54"W	Media 2582 msnm Máxima 46502 msnm Mínima 2610 msnm	Temperatura: 18 °C Viento: 13 km/h Humedad: 50%	15
Uribea – Maicao (Guajira)	11°42'50"N 72°15'57"W 11°22'40"N 72°14'29"W	10 msnm 52 msnm	Temperatura: 31 °C Viento: 19 km/h Humedad: 68% Temperatura: 30 °C Viento: 13 km/h Humedad: 73%	22
Cenicaña (Valle del Cauca)	3°25'00"N 76°31'00"W	1561 msnm	Temperatura: 27 °C Viento: 3 km/h Humedad: 65%	12

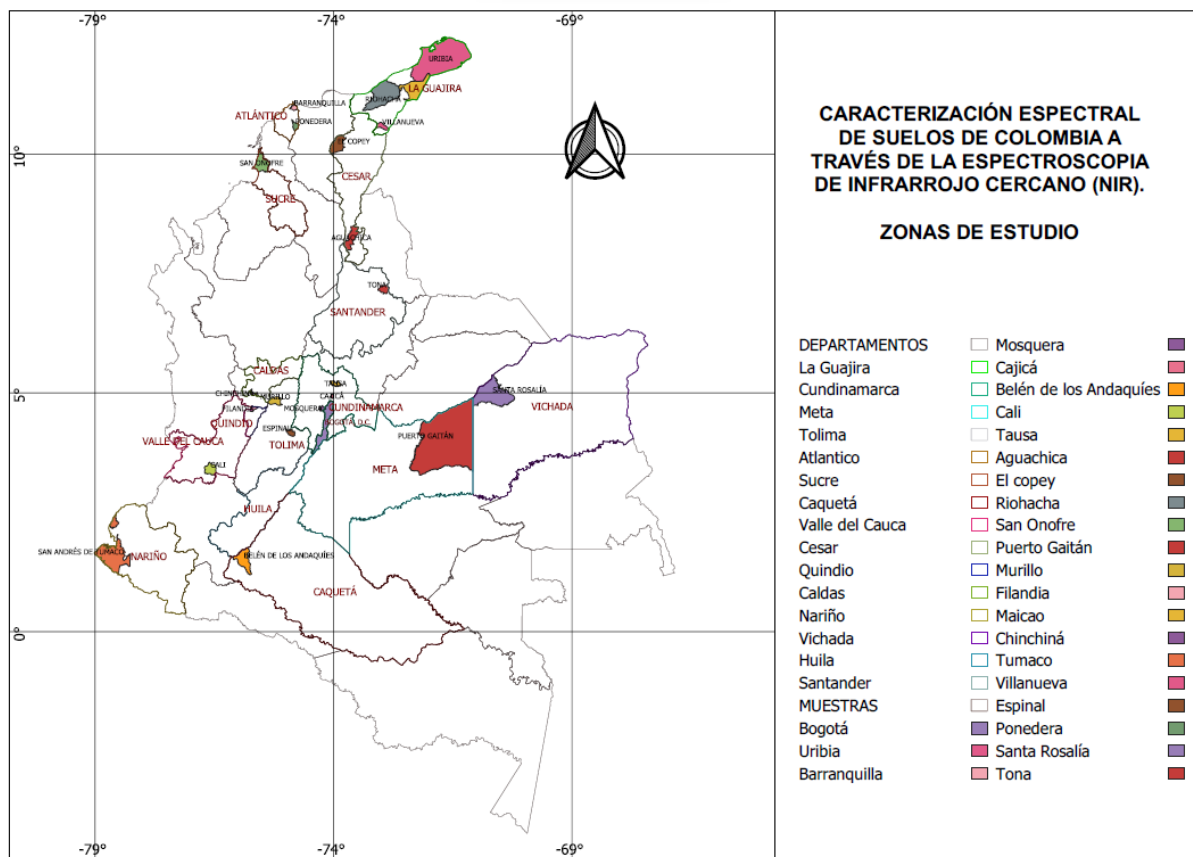
Páramo de Guerrero (Tausa- Cundinamarca)	5°16'00"N 74°10'00"W	3200- 3780 msnm	Temperatura: 17 °C Viento: 16 km/h Humedad: 55%	20
Aguachica, El Copey (Cesar)	8°18'24"N 73°36'55"W 10°08'56"N 73°57'36"W	162 msnm 180msnm	Temperatura: 30 °C Viento: 5 km/h Humedad: 71% Temperatura: 30 °C Viento: 8 km/h Humedad: 67%	2
Riohacha (Guajira)	11°32'39"N 72°54'25"W	5 msnm	Temperatura: 31 °C Viento: 18 km/h Humedad: 66%	1
San Onofre (Sucre)	9°44'14"N 75°31'32"W	30 msnm	Temperatura: 29 °C Viento: 10 km/h Humedad: 79%	1
Murillo (Tolima)	4°52'25"N 75°10'14"W	2950 msnm	Temperatura: 30 °C Viento: 6 km/h Humedad: 60%	1
Filandia (Quindío)	4°40'24"N 75°39'30"W	1923 msnm	Temperatura: 21 °C Viento: 8 km/h Humedad: 68%	1
Chinchiná (Caldas)	4°40'24"N 75°39'30"W	112.4 msnm	Temperatura: 26 °C Viento: 10 km/h Humedad: 70%	1
Tumaco (Nariño)	1°48'24"N 78°45'53"W	1 msnm	Temperatura: 26 °C Viento: 13 km/h Humedad: 75%	1
Santa Rosalía (Vichada)	5°07'34"N 70°52'32"W	320 msnm	Temperatura: 30 °C Viento: 13 km/h Humedad: 66%	1
Villanueva (Guajira)	10°36'19"N 72°58'48"W	250 msnm	Temperatura: 30 °C Viento: 5 km/h Humedad: 57%	1
Vereda Peñas Blancas (Huila)	3°02'35.2"N 75°16'26.8"W	538 msnm	Temperatura: 27 °C Viento: 3 km/h Humedad: 58%	1

22 Caracterización espectral de suelos de Colombia a través de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

Berlín- Tona (Santander)	7°12'07"N 72°57'59"W	1909 msnm	Temperatura: 21 °C Viento: 8 km/h Humedad: 76%	1
-----------------------------	-------------------------	--------------	---------------------------------------------------------	---

Con el fin de ilustrar la anterior tabla, se realiza el siguiente mapa denotando los departamentos y los lugares de las zonas de estudio demarcadas con diferentes colores (Ilustración 2-1):

Ilustración 2-1. Mapa de las zonas de estudio.



Fuente: Propia

2.2 Caracterización de las zonas - Cromatografía de Pfeiffer

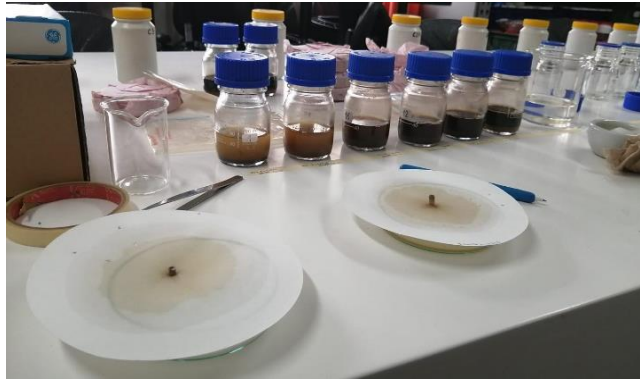
Como se mencionó anteriormente, dado que no se realizó un muestreo específico para la recolección de las muestras, se optó por caracterizarlas mediante la técnica de cromatografía de Pfeiffer. Esta técnica se considera una herramienta cualitativa que proporciona una aproximación de la información sobre las características del suelo en el momento de su obtención, permitiendo observar claramente la relación entre la materia orgánica (MO), los microorganismos y los minerales presentes. Además, la cromatografía de Pfeiffer se destaca por ser una herramienta fácil de usar e interpretar.

Con el fin de lograr esta caracterización se escogió una o dos muestras aleatorias por zona de estudio (Anexo A) para un total de 40 cromatogramas. Para esta práctica se usaron las siguientes soluciones:

- Solución de Hidróxido de sodio: Este reactivo consiste en mezclar el hidróxido de sodio (sosa, NaOH) en agua destilada al 1%.
- Solución de Nitrato de plata: Este reactivo consiste en mezclar el nitrato de plata (AgNO_3) en agua destilada al 0.5%.

Al estar las muestras secas y tamizadas, se tomaron 5 g agregándoles 50 ml de la solución de hidróxido de sodio al 1% en un vaso de precipitado, se agitó suavemente con 7 repeticiones a la derecha y a la izquierda repitiendo la serie a los 0, 15 y 60 minutos, luego se dejó reposar por 5 h y así llegar a la fase de revelado, con esto se solubilizan las sustancias nitrogenadas del metabolismo de los microorganismos. El papel filtro utilizado fue Whatman número 4, se impregnó con la solución de nitrato de plata hasta los 4 cm, luego se dejó secar en un espacio oscuro (Figura 2-2). De la muestra diluida de suelo se tomaron 10 ml de la superficie con una jeringa y se agregó el contenido en una caja de Petri, donde se colocó el papel filtro ya impregnado de la solución de nitrato de plata, dejando que el papel tome la solución de la muestra y el hidróxido de sodio a través de un pabilo por efecto de capilaridad, generando una serie de colores, formas y distancias específicas. Se dejó secar con luz indirecta en un periodo entre 5 a 7 días para tener el mejor revelado.

Figura 2-2. Elaboración de la cromatografía.



Fuente: Propia.

Para la interpretación cualitativa se tiene en cuenta lo dicho en el libro de Restrepo y Piñero (2011), se escogen los cromas que cumple o no con las condiciones para cada zona, y se realizan gráficas de torta a través de Excel, con el fin de obtener la proporción para cada cualidad o zona.

2.3 Métodos de laboratorio convencionales para determinar textura en suelos

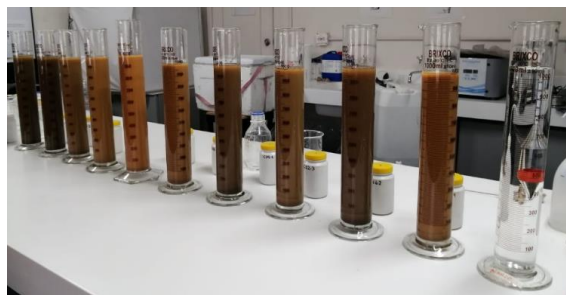
2.3.1 Método de Bouyoucos o del Hidrómetro

Para determinar la textura se realizaron dos métodos, el de Bouyoucos y el de Pipeta, se hicieron las pruebas de análisis convencional a las muestras que lo requerían, varios de los sets de muestras que se recibieron contaban con el análisis de textura por Bouyoucos.

Para ambos métodos se deben hacer una preparación previa a la muestra, en el caso del método de Bouyoucos se debe dejar 50 g de muestra, ya seca y tamizada, en 50ml del dispersante Hexametáfosfato de Sodio (NaPO_3)₆ al 5%, y 200 ml de agua destilada, en agitación durante toda la noche. En el caso del método de la Pipeta o de Robinson, antes de prepararla con el dispersante se debe eliminar el contenido de materia orgánica con Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2).

En el método de Bouyoucos (Figura 2-3), luego de la agitación, se pasó la solución a una probeta de 1L, y se aforó con agua destilada, se agitó el contenido con la varilla de agitación por 20s, luego de 10s se sumergió el hidrómetro y a los 40s se tomó la primera medida (LM_{40}), también se tomó la temperatura con el fin de hacer la corrección, para lo cual se tuvieron en cuenta los factores de corrección (este dato se suma al dato tomado con el hidrómetro). La muestra se dejó en reposo, sin movimiento alguno y a las 2h se tomaron de nuevo las mediciones. Al mismo tiempo, se realizó el procedimiento para el blanco (solución con agua destilada y el dispersante), esto con el fin de hacer los ajustes necesarios.

Figura 2-3. Elaboración del método del hidrómetro o de Bouyoucos.



Fuente: Propia.

Se usaron las siguientes ecuaciones (2.1, 2.2) para los cálculos:

$$C_{40} = LMC_{40} - LBC_{40} \quad (2.1)$$

$$C_2 = LMC_2 - LBC_2 \quad (2.2)$$

Para finalmente calcular el contenido de Arena (A), Arcilla (Ar), Limo (L) que tenía cada muestra, se efectuaron las siguientes ecuaciones (2.3, 2.4, 2.5):

$$\%A = 100 - \frac{C_{40}}{M_{SS}} * 100 \quad (2.3)$$

$$\%Ar = \frac{C_2}{M_{SS}} * 100 \quad (2.4)$$

$$\%L = 100 - (\%Ar + \%A) \quad (2.5)$$

2.3.2 Método de la pipeta de Robinson

En el método de la pipeta de Robinson el análisis consiste en efectuar extracciones a profundidades y tiempos determinados, que supone la eliminación por sedimentación de todas las partículas mayores a un diámetro x (Moreno y Márquez, 2018). Una vez se realizó el pretratamiento por duplicado para la eliminación de materia orgánica con peróxido de hidrogeno, se determinó la masa seca de una de las muestras y se continuó el proceso. Se le agregaron 200 ml de agua destilada y 10 ml de dispersante, y se dejó en agitación por 12 horas. Después, se pasó la solución por el tamiz #270, para posteriormente pesar el suelo retenido. Se tuvo en cuenta que el material retenido equivale a arenas, así que se determinó su masa después de ser secado en horno.

El suelo que paso son los compuestos finos como la arcilla y el limo, con esta muestra se llevó a la probeta de 1L y se aforó con agua destilada. Luego, se inició el cronometro y se tomaron las medidas con la pipeta, para esto se tuvo en cuenta las tablas de calibración programando la profundidad para así determinar el porcentaje de arcilla y de limo. También, en este caso se preparó un blanco (testigo) con agua destilada y 10ml de Hexametáfosfato, y se aforo hasta los 1000 ml de volumen.

Utilizando el peso de la muestra retenida en el tamiz No. 270 y la muestra pipeteada, se puede determinar el contenido de arena, arcilla y por diferencia de porcentaje de limo, como se determina en las siguientes ecuaciones (2.6 – 2.8):

$$\%A = \frac{\text{Masa de arena}}{\text{Masa muestra inicial}} * 100 \quad (2.6)$$

$$\text{Masa Ar} = \frac{\text{Peso arcilla} - \text{Masa testigo}}{\text{Masa muestra inicial}}$$

$$\%Ar = \left(\frac{\left(\frac{\text{Masa de arcilla}}{\text{Masa muestra inicial}} * 100 \right) * 1000}{20} \right) \quad (2.7)$$

$$\%L = 100 - (\%Ar + \%A) \quad (2.8)$$

2.3.3 Análisis estadístico para métodos de laboratorio convencionales

Con el objetivo de determinar el método más preciso, para así compararlo con la espectroscopia NIR, se llevó a cabo este análisis, donde el procesamiento estadístico se basó en una regresión lineal. En este análisis se determinó el coeficiente de determinación, la ecuación de la recta y la correspondiente gráfica de dispersión, siguiendo la propuesta de Norambuena et al., (2002). Cabe destacar que este análisis estadístico se aplicó únicamente a las 100 muestras obtenidas del Centro de Investigación Carimagua, ubicado en Puerto Gaitán (Meta).

2.4 Análisis cualitativo y cuantitativo NIR

Cada muestra tamizada se dispone en una placa Petri, para posteriormente situarlas en el sensor NIRFlex N-500 (BÜCHI Labortechnik AG), el cual recopila lecturas de reflectancia espectral en el rango NIR con longitud de onda desde los 1000 nm hasta 2500 nm (Figura 2-4). Para la realización de los modelos de calibración se tuvieron en cuenta 751 longitudes, esto con el fin de realizar el procesamiento más rápido.

Figura 2- 4. Espectroscopia de infrarrojo cercana.



Fuente: Propia.

En el caso de las firmas espectrales se realizó una determinación cualitativa, cuyo fin era analizar la intensidad de la reflectancia, los picos, valles y curvas características, junto con su comportamiento. Las curvas espectrales del suelo almacenan información gracias a sus

diferentes combinaciones y superposiciones de respuestas espectrales de los componentes del suelo.

Se llevó a cabo un análisis de datos para calcular medidas de localización como la media, mediana, mínimo y máximo, de variabilidad (coeficiente de variación, CV, desviación estándar SD), de forma (asimetría y curtosis) para cada atributo al igual que se hizo un análisis exploratorio de datos para los valores atípicos y pruebas de normalidad, para esto se utilizó el programa Minitab.

Las muestras de suelo fueron asignadas a un conjunto de calibración, el procedimiento analítico incluyó la obtención del espectro en infrarrojo de cada muestra que es usada como referencia; para obtener los modelos de calibración se usó el programa Parles el cual tiene en cuenta el modelo de Regresión de Mínimos Cuadrados Parciales (PLSR), y los espectros fueron procesados mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA).

Para la validación del modelo se tendrá en cuenta el coeficiente de determinación (R^2), raíz del error medio cuadrático de la predicción (RMSE), error medio (ME), desviación estándar del error (SDE) y la desviación residual de la predicción (RPD), siguiendo la metodología propuesta por Camacho-Tamayo (2013).

3. Resultados

3.1 Caracterización cualitativa de las zonas de estudio - Cromatografía de Pfeiffer

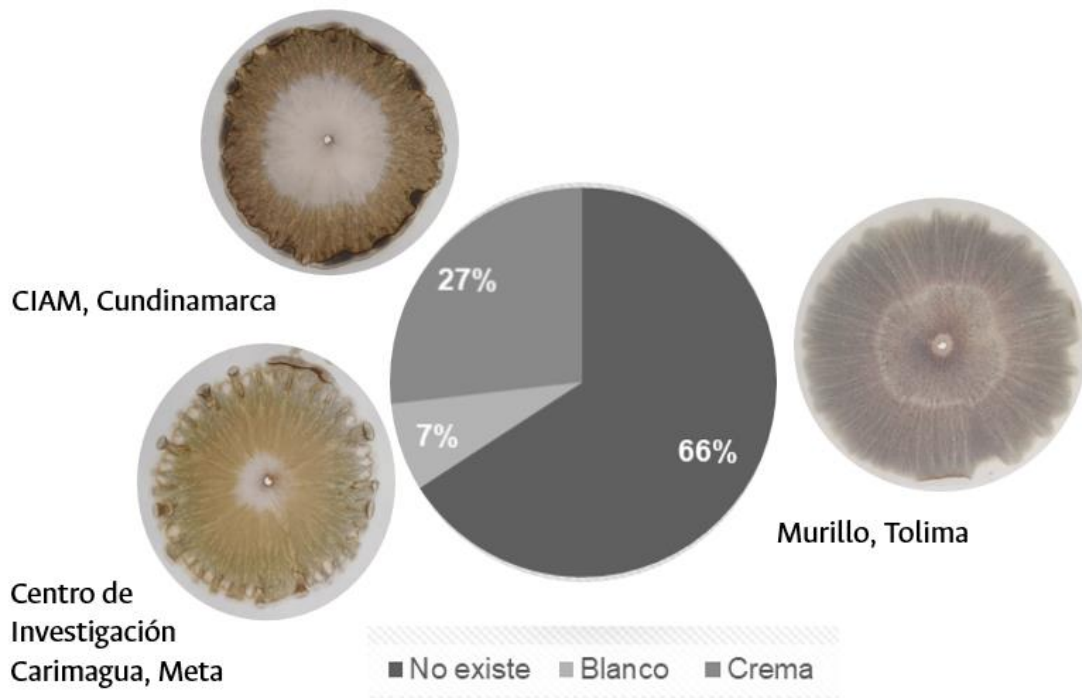
Las cromatografías obtenidas a partir de las muestras de suelos de Colombia (Anexo A) se categorizaron según las zonas y las distribuciones del cromatograma. También, se distinguieron cualidades como la integración o armonización de sus componentes.

En la zona central o de oxigenación lo primero que se observa son colores cafés, lo que da indicio de suelos desgastados (Figura 3-1). Además, se obtuvieron casos donde es ausente esta zona, con ello se puede inferir que el suelo no cuenta con estructura, y que puede estar compactado por uso excesivo de maquinaria o paso recurrente de animales, esto último ocurre, por ejemplo, en la práctica de ganadería extensiva asociada a la pérdida de macroporosidad, deteriorándose más cuando el suelo se encuentra húmedo (Medina, 2016).

En cuanto a la distribución de esta zona se presenta que en un 66% de las muestras no existe el centro, esto indica que suelen ser suelos sin microbiota, suelos excesivamente mineralizados, o sin cobertura vegetal como es el caso de la muestra de suelo de Maicao en la Guajira, este municipio se encuentra en la zona media considerado como uno de los depósitos de arenas eólicas, también este suelo se caracteriza por tener problemas de salinidad y sodicidad lo cual determina una vegetación muy pobre (Corporación Autónoma Regional de la Guajira [CORPOGUAJIRA], s.f.). Lo identificado en el cromatograma también corresponde a lo mencionado en la bitácora de campo proporcionada por el docente de la Universidad del Norte.

El 27% de las zonas tratadas reflejan el color crema, este es indicador de buen suelo, sin compactación, donde posiblemente haya buena aireación y estructura, en suelos como los del Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CIAM), según Varón (2016), predominan las texturas finas que con mal manejo pueden influir directamente en procesos de degradación del suelo como la compactación, generando capas restrictivas al crecimiento de raíces que determinan la profundidad efectiva de un suelo. Y el 7% de las muestras, presentan el centro de color blanco, lo cual revela que hay una aplicación inadecuada de abonos nitrogenados o que son suelos que se encuentran sometidos a la aplicación constante de productos procesados.

Figura 3-1. Distribución de la zona central o de oxigenación.



Fuente: Propia.

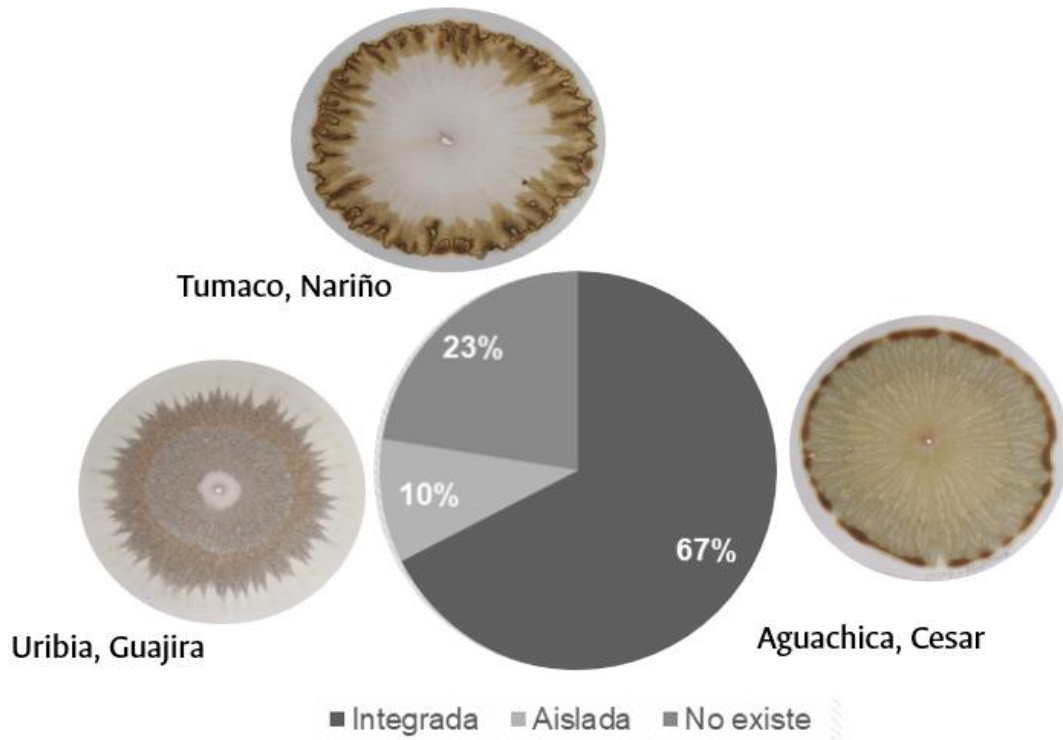
En la zona interna o mineral, es donde se concentra la mayoría de las reacciones minerales, allí se obtuvieron cromas con colores claros o cremosos, presentando integración. Por el contrario, si tiene colores oscuros, se concluye que es un suelo

destruido y altamente mineralizado. Como ejemplo de lo anterior, se puede asociar una de las muestras del Centro de Investigación de Carimagua - Meta, según Marulanda (2014) el potencial agropecuario es bajo ya que la fertilidad y las condiciones físicas no son óptimas, por lo tanto, se deben hacer correcciones para detener el deterioro de los recursos naturales y propiciar desarrollo de sistemas agrícolas.

En la Figura 3-2, se denota que el 67% de las muestras presentan integración entre zonas, esto se debe a que el microbiota está interactuando con los minerales, en el 10% de las muestras se genera una integración aislada, es decir, en menor cantidad hay una interacción de los componentes del suelo. Lo anterior se debe a que, por ejemplo, en la zona de estudio Uribia (Guajira), según la descripción de campo otorgado por el docente de la Universidad del Norte, quien proporciono las muestras menciona: “las muestras de suelo fueron obtenidas debajo del dosel de un árbol de Brasil (*Hematoxilon brasiletto*), en relictos de bosque conservado”, lo cual hace que los animales y microorganismos ayuden a la interacción con componentes químicos del suelo.

Por el contrario, en el 23% de las muestras no existe la zona interna, esto ocurre cuando en el cromatograma se puede identificar claramente la separación de las zonas. En casos como en Tumaco (Nariño), se puede determinar que la vocación agrícola es poca ya que cuenta con factores limitantes, como poca o nula fertilidad, alta toxicidad de aluminio y acidez, debido a las altas inundaciones y mal drenaje, esto hace que se deban realizar manejos especiales para ser zonas aprovechables para el desarrollo agrícola (Petto y Fandiño, 1988).

Figura 3-2. Distribución de la zona interna o mineral.



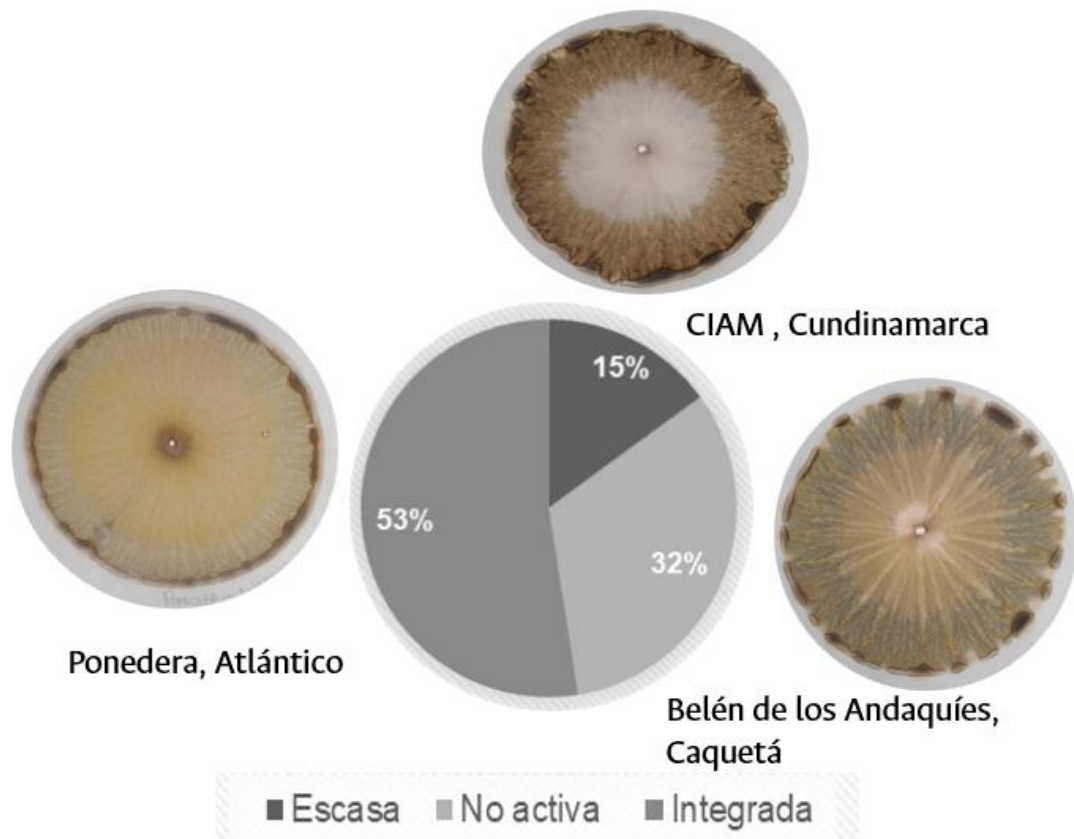
Fuente: Propia.

La Zona Intermedia se destaca por la presencia o ausencia de MO en las muestras de suelo, al igual que en la anterior zona, si esta es fácilmente detectada no es un suelo armónico y suele reflejar ausencia de MO, lo anterior en el caso de no presentarse o ser escasa (15%, Figura 3-3), si son de colores oscuros y muy distintos entre ellas posiblemente la MO no estará activa (32% de las muestras) lo que significa que debido a la falta de microbiología no puede ser aprovechada esta zona proteica.

En la Figura 3-3, el 53% de las muestras contrario a lo mencionado anteriormente, denotan integración entre la Z1 y Z2, encontrando armonía, con lo cual se puede indicar buena actividad biológica en el suelo. Como en Ponedera, municipio del departamento del Atlántico, considerada como uno de los municipios para fomentar la seguridad alimentaria,

ya que, según el IGAC (s.f.), tiene capacidad para actividades agrícolas y ganaderas, contando con cultivos como el algodón, arroz, sorgo, ajonjolí, yuca, entre otros.

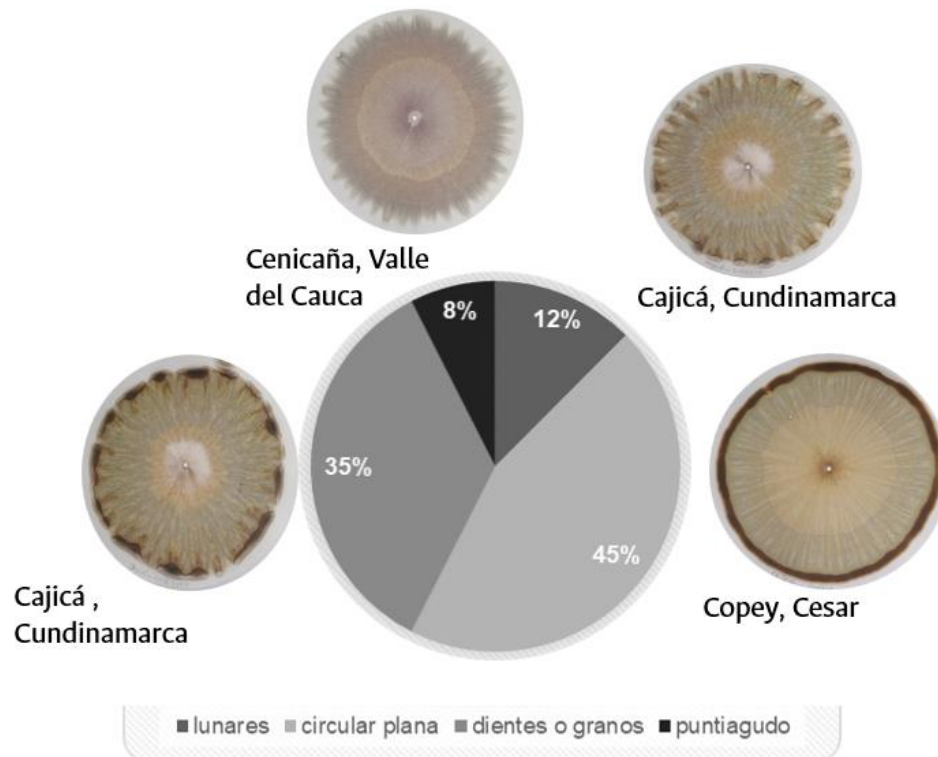
Figura 3-3. Distribución de la zona intermedia o de Materia orgánica.



Fuente: Propia

En los cromatogramas se pudieron detectar distintas formas en la zona externa o enzimática, como terminaciones puntiagudas, circulares planas, con presencia de lunares y dientes o granos (Figura 3-4).

Figura 3-4. Distribución de la zona externa o enzimática.



Fuente: Propia.

Las puntas agudas (8%) significan simplificación de minerales en el suelo, con poca variedad del mineral. También, se pudo observar este caso junto con colores oscuros, lo que indica condiciones no deseables en un suelo. Se presentaron nubes y lunares en un 12%, con ello se deduce que son suelos con abundancia y variedad nutricional disponible para un uso productivo del suelo. Se presentan granos y dientes en un 35% de las muestras, esto quiere decir que hay gran actividad microbiológica diversificada y constante, lo cual permite un desarrollo favorable en la formación enzimática. La terminación no ideal en forma plana y sin bordes es la que predomina con un 45% del total de los cromas elaborados.

En conclusión, se observa que la mayoría de los suelos analizados mediante la cromatografía de Pfeiffer muestran signos de compactación, lo que resulta en una falta de

estructura. Aunque se pueden identificar características favorables, como los niveles de materia orgánica en la zona 3 del cromatograma, no existe una armonía en la microbiota presente en el suelo, lo que impide una adecuada utilización de los minerales disponibles. Es importante destacar que esta herramienta de análisis cualitativo no permite generalizar sus interpretaciones para el municipio o departamento del cual se obtuvo la muestra, sino que cada interpretación es específica para la ubicación exacta del suelo en el momento de su recolección. Siempre se debe considerar el contexto geográfico y las condiciones locales al analizar los resultados.

3.2 Comparación entre los métodos de hidrómetro y de la Pipeta

Con el objetivo de determinar el método más preciso, y así compararlo con la espectroscopia NIR, se llevó a cabo este análisis, donde el procesamiento estadístico consistió en realizar la estadística descriptiva, con medidas de tendencia central y de dispersión, la correlación de Pearson, el análisis de regresión lineal ajustada con ecuación de la recta y junto con la gráfica de dispersión.

En la Tabla 3-1, se describen de manera cuantitativa los datos, aquellos que hacen referencia a las partículas de Ar, A, y L nombrados con $_P$ y $_B$ indican los métodos de laboratorio tradicional Pipeta y Bouyoucos respectivamente. Se puede observar que en las medidas de tendencia central como la media (\bar{x}) y la mediana (Med) da una diferencia significativa en los resultados obtenidos en cada método, esto se puede corroborar con la medida de variabilidad, la desviación estándar (SD), ya que la variabilidad es mayor en los datos de arena y limo obtenidos por Bouyoucos ($_B$) que en lo obtenido por Pipeta ($_P$).

Sin embargo, ocurre lo contrario en el coeficiente de variación (CV), con esta medida se puede comparar ambos grupos, ya que se tienen medias aritméticas diferentes, la desviación estándar puede resultar insuficiente al realizar un análisis de los datos dispersos de una muestra. Los datos difieren entre sí en Arena $_P$ y en Arena $_B$, siendo mayor en el primer caso. En el caso de Limo y Arcilla es mayor la dispersión en el método de Bouyoucos que en el de Pipeta.

Tabla 3-1. Estadística descriptiva de las 100 muestras tratadas bajo los métodos de Bouyoucos y Pipeta.

Propiedad	\bar{x}	Med.	Máx.	Mín.	SD	CV	Asimetría	Curtosis	Datos atípicos
Arena_B	55,18	52	87,6	24	15,4	27,9	0,31	-0,54	
Arena_P	3,8	3,51	10	1,07	1,82	47,94	0,98	0,69	10,1
Limo_B	33,47	36	54	10	10,52	31,43	-0,49	-0,53	
Limo_P	70,9	70,95	85,64	54,02	5,9	8,33	0,03	0,24	85,6 56,5 54
Arcilla_B	11,34	10	34	0	7,54	66,45	0,76	0,12	54 34
Arcilla_P	25,28	25,045	43,6	10,24	6,6	26,18	0,07	-0,46	

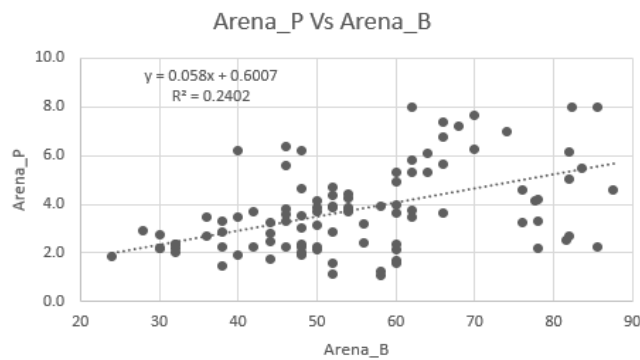
Con el fin de determinar la relación entre las propiedades medidas bajo los dos métodos, se hace el cálculo de correlación de Pearson, para el caso de las propiedades estudiadas hay correlación positiva (>0); en este caso las variables estarían asociadas en un sentido directo para ambos métodos, sin embargo, en el caso del Limo se puede inferir que hay una correlación inexistente (0,095), y para el caso de Arena y Arcilla se tiene una correlación moderada, ya que sus valores oscilan entre 0,3 y 0,5. Tiene sentido que para ambas prácticas la relación de sus propiedades Arena, Limo y Arcilla sea negativa ya que estas están asociadas de forma inversa.

Tabla 3-2. Correlación de Pearson para los métodos de Bouyoucos y Pipeta.

	Arena_B	Limo_B	Arcilla_B	Arena_P	Limo_P
Arena_B					
Limo_B	-0,898				
Arcilla_B	-0,789	0,438			
Arena_P	0,49	-0,323	-0,055		
Limo_P	0,052	0,095	-0,239	0,261	
Arcilla_P	-0,182	0,004	0,365	-0,508	-0,964

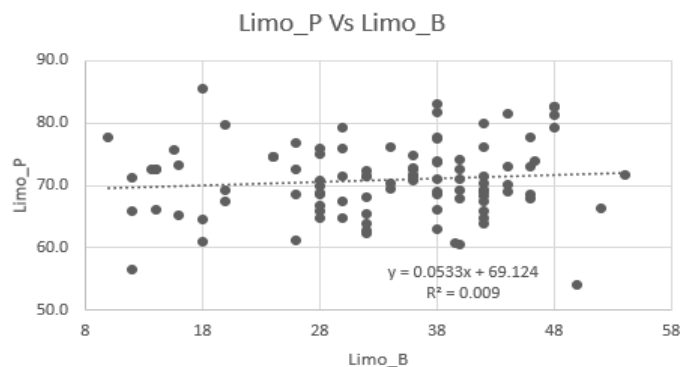
Con las siguientes figuras se corrobora la correlación positiva que se tiene entre los métodos, además se puede observar cómo dos variables se relacionan entre sí, en el caso Arena_P Vs Arena_B (Figura 3-5), y a través del coeficiente de determinación (R^2), se indica que no se logra modelar los datos con precisión, ya que el 24 % de la variable dependiente (Arena_P) es predicha por la variable independiente (Arena_B). En ninguno de los casos se muestra un ajuste apropiado para modelar el comportamiento de las propiedades a través del método de Pipeta y de Bouyoucos, como se observa en la Tabla 3-3.

Figura 3-5. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso de Arena_P Vs Arena_B.



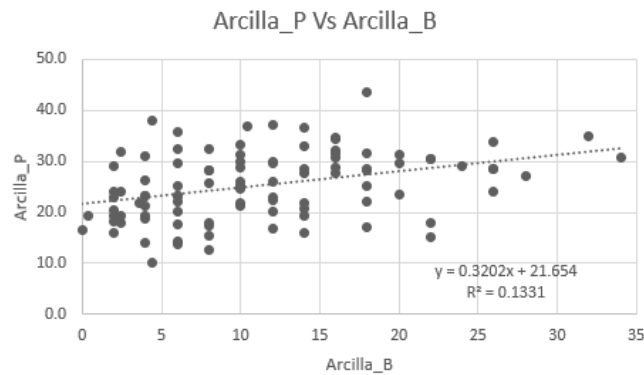
Fuente: Propia.

Figura 3-6. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso del Limo_P Vs Limo_B.



Fuente: Propia.

Figura 3-7. Gráfica de dispersión, ecuación de regresión y coeficiente de determinación en el caso del Arcilla_P Vs Arcilla_B.



Fuente: Propia.

Tabla 3-3. Ecuaciones de regresión y coeficientes de determinación para cada propiedad.

Ecuación de regresión	R ²	R ² ajustado
Arena_P=0,6007 + 0,05805 Arena_B	24%	23,2%
Limo_P=69,12 + 0,05328 Limo_B	0,9%	0,0%
Arcilla_P=21,65 + 0,3202 Arcilla_B	13,3%	12,4%

Lo anterior se puede asociar con lo mencionado por Solonyezny et al., (2015), donde la técnica del hidrómetro de Bouyoucos es adecuada para realizar pruebas en suelos arenosos, pero no logra un buen ajuste en suelos franco-limosos o limosos. En dicho estudio se deduce que la técnica del hidrómetro no se adapta a este tipo de suelos debido a que la falta del acondicionamiento previo provoca que parte del limo e incluso de arcilla queda unida a la arena y de esta forma se subestiman las fracciones finas, incrementando el porcentaje de arena.

Aunque el método de pipeta garantiza una mayor precisión en comparación con el método de Bouyoucos, es importante tener en cuenta que también requiere más tiempo y dedicación. Tanto en el método de pipeta como en el de Bouyoucos, los resultados obtenidos dependen de la habilidad técnica y precisión del operador que los realiza. A pesar de que actualmente se realiza más comúnmente el método de Bouyoucos, no se puede garantizar la precisión de sus resultados. Por esta razón, es necesario establecer procedimientos estandarizados para la ejecución de ambos métodos.

En base a la información disponible en bibliografía y estudios robustos sobre suelos de la zona, se puede concluir que el método de Bouyoucos es el más cercano a los datos existentes. Por lo tanto, este método será utilizado como base quimiométrica para obtener modelos a través de la técnica de espectroscopia. Si es necesario, se pueden complementar los procedimientos o ajustar las técnicas de laboratorio utilizadas para garantizar una mayor precisión en los resultados obtenidos.

3.3 Análisis textural para las zonas de estudio

Las regiones naturales que se comprenden con este estudio son la región Caribe, Andina Orinoquia y amazónica, en el libro “Suelos y tierras de Colombia” (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2015) se hace una recopilación de información en donde se menciona que la región Caribe cuenta con grandes contrastes topográficos, geológicos, climatológicos y de vegetación. La península de la Guajira constituye la parte más árida del país, en la zona de alta y la media Guajira se presentan planicies cubiertas con depósitos de arenas eólicas y pequeños salares, allí se puede encontrar clases de suelos como Aridisoles y Entisoles. En los suelos del orden Aridisol, el proceso formativo dominante se basa en la transformación física del material, y la erosión es un factor continuo en dichos suelos.

Los Vertisoles se presentan en zonas con marcada estacionalidad, se caracterizan por tener una pendiente relativamente baja y materiales alterables con abundantes arcillas, estos son suelos arcillosos presente en la región caribe y en los valles interandinos, en

estas regiones son numerosos los conflictos de uso de los suelos por sub o sobreutilización.

La Región Andina se caracteriza por tener distintos ambientes geológicos y morfogenéticos, allí se encuentran varias clases de suelos como los Inceptisoles, estos constituyen la clase de suelos más extensa en Colombia. En su evolución intervienen procesos de ganancia de materiales orgánicos o minerales y en la mayoría perdida de bases o erosión, su potencialidad de uso en muchos casos está restringida por riesgos de erosión, baja fertilidad y por el mal manejo del agua. El manejo de los Molisoles debe asegurar el mantenimiento de su materia orgánica o buscar su incremento. Los andisoles están asociados a la influencia de cenizas volcánicas y materiales vinculados con estas, los suelos suelen ser productivos, allí se pueden presentar transformaciones de productos orgánicos en humus y de los componentes de las cenizas en materiales sin formas definidas.

Los Espodosoles, se localizan predominantemente en las zonas orientales (Vaupés, Vichada, Guainía) bajo la influencia de sedimentos arenosos provenientes de la alteración de las rocas. La evolución de los Alfisoles se destaca por el proceso de translocación arcillosa, su potencialidad agrícola está restringida en condiciones naturales por el grado de desarrollo de los horizontes enriquecidos en arcillas y por su susceptibilidad a la erosión.

Los Oxisoles son suelos muy alterados, con arcillas de baja actividad (caolinita) y de muy baja fertilidad natural, frecuentemente de coloraciones rojas o amarillas. Los Histosoles o suelos orgánicos, se presentan en paisajes de montaña o planicie con prevalencia de condiciones frías (páramos) donde su actividad biológica es menor, ambas restringen la descomposición orgánica (mineralización). Los Ultisoles son suelos ácidos y altamente intemperizados, con una acumulación significativa de arcilla y óxidos de hierro y aluminio. Estos suelos se encuentran en climas cálidos y húmedos, y suelen ser típicos de regiones tropicales y subtropicales.

Se empleó el método de los Bouyoucos o del hidrómetro para obtener resultados que permitieron elaborar los diagramas del triángulo textural correspondientes a cada zona de estudio (ver Anexo B). Posteriormente, se presenta un resumen de los hallazgos en la Tabla 3-4, organizando la información de acuerdo con el grupo textural establecido en el libro "Suelos y tierras de Colombia" del IGAC.

Es fundamental tener en consideración que la clasificación taxonómica de los suelos tratados no es exacta, ya que puede variar dependiendo de las características específicas de cada área y de los factores geológicos y climáticos locales. Por lo tanto, los órdenes de suelo pueden cambiar según las condiciones de cada sitio en particular. En este sentido, se realiza una aproximación teniendo en cuenta la base bibliográfica y la predominancia del orden en el área estudiada.

Es importante destacar que, para una determinación más precisa, se deben tener en cuenta las demás propiedades químicas, físicas y químicas de las muestras, estos aspectos adicionales permitirán una clasificación más precisa para determinar el orden de suelo correspondiente.

Tabla 3-4. Clases texturales encontradas en las zonas de estudio y grupo textural.

Localización	Número de muestras	Orden de suelo	Grupo textural *	Clase textural / Método de Bouyoucos
Ponedera (Atlántico)	15	Vertisol	Gruesa, media y fina	Arenosa, areno francosa, franco arcilloso arenoso, franca, franco arcillosa y arcillosa
Barranquilla (Atlántico)	15	Entisol	Gruesa, media y fina	Areno francosa, franco arenoso, franco arcillo arenosa, arcillosa
Cajicá (Cundinamarca)	14	Andisol	Gruesa, media y fina	Franco arenosa, franca, franco arcillo arenosa, franco arcilloso, arcillosa

Bogotá (Bogotá)	15	Inceptisol y Alfisol	Gruesa, media y fina	Franco arenosa, franca, franco limoso, franco arcilloso, franco arcillo limosa
Belén de los Andaquíes (Caquetá)	15	Ultisol	Gruesa, media y fina	Franco arenosa, franca, franco arcilloso, franco arcilloso arenosa, arcillosa
Centro Agropecuario "La Granja" Espinal (Tolima)	20	Vertisol	Gruesa y media	Areno francosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa, franca
Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CIAM) Mosquera (Cundinamarca)	20	Histosol	Gruesa y media	Areno francosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa
Uribe – Maicao (Guajira)	22	Aridisol	Gruesa	Areno francosa, franco arenoso
Riohacha (Guajira)	1	Aridisol	Gruesa	Franco arenosa
Villanueva (Guajira)	1	Aridisol	Gruesa	Franco arenosa
San Onofre (Sucre)	1	Aridisol y Vertisol	Gruesa	Areno francosa
Aguachica, El Copey (Cesar)	2	Ultisol	Gruesa	Franco arenosa
Murillo (Tolima)	1	Inceptisol	Gruesa	Arenosa

Páramo de Guerrero (Tausa- Cundinamarca)	20	Histosol	Gruesa	Areno francosa, franco arenoso
Filandia (Quindío)	1	Andisol	Gruesa	Arenosa
Chinchiná (Caldas)	1	Inceptisol	Gruesa	Arenosa
Tumaco (Nariño)	1	Histosol	Gruesa	Arenosa
Berlín- Tona (Santander)	1	Vertisol	Gruesa	Arenosa
Santa Rosalía (Vichada)	1	Ultisol	Gruesa	Arenosa
Centro de Investigación Carimagua. Puerto Gaitán (Meta)	100	Oxisol	Media y fina	Limosa, Franco Arcillo Limosa, Arcillo limosa
Cenicaña Cali (Valle del Cauca)	12	Entisol	Media y fina	Franco arcilloso arenosa, franco arcilloso, arcillosa
Vereda Peñas Blancas (Huila)	1	Inceptisol	Fina	Arcillo arenosa

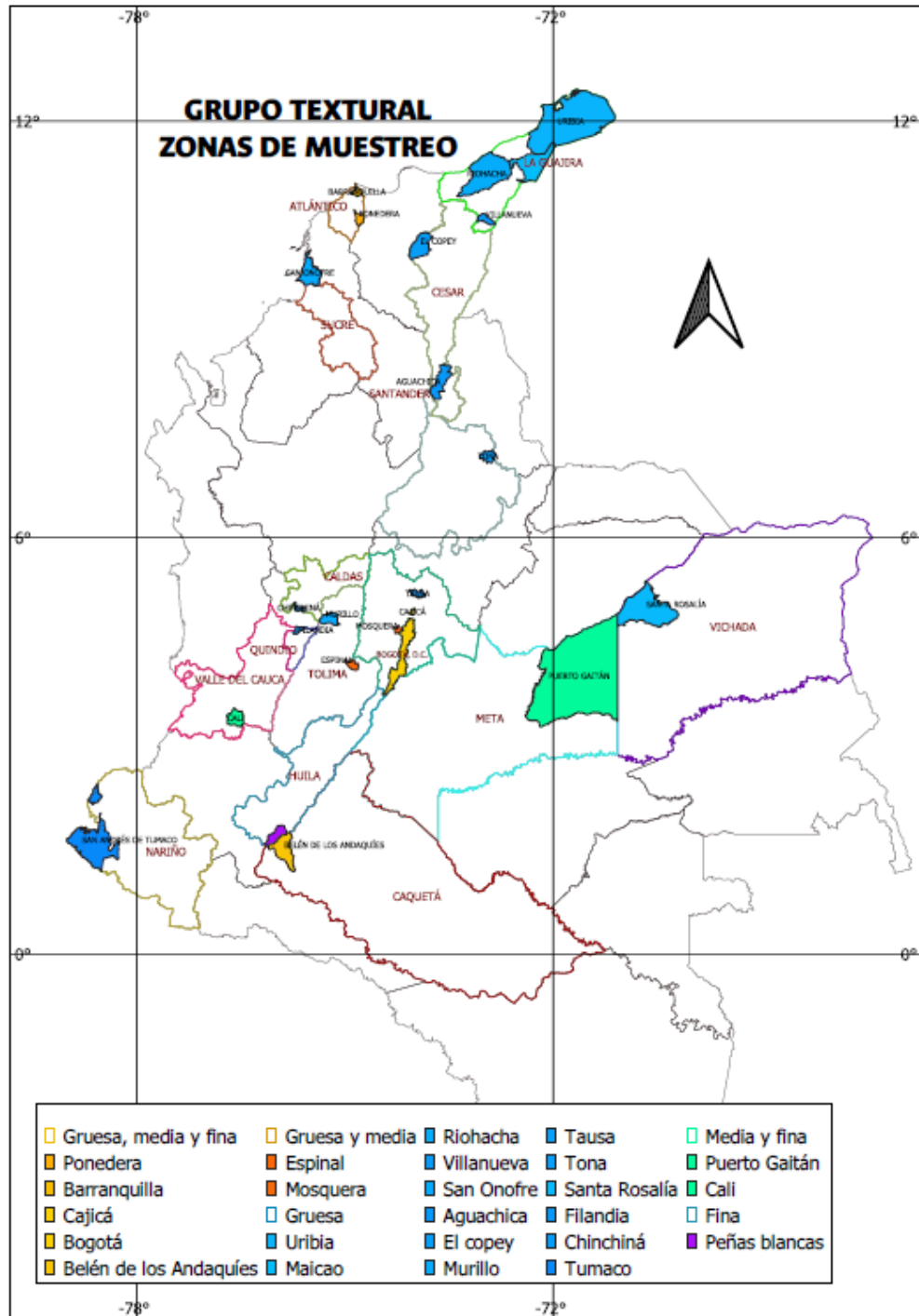
*Basado en la interpretación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], Libro “Suelos y tierras de Colombia”, (2015).

Con el fin de confirmar la variabilidad, y poder categorizarlos en grupos más generales, se agrega en la tabla los grupos texturales, según el IGAC se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Suelos de textura gruesa: Arenosos, areno franco y franco arenoso.
- Suelos de textura media: Franco, franco limoso, limosa, franco arcilloso, franco arcillo arenosa, y franco arcilla limosa.
- Suelos de textura fina: Arcillo arenosa, arcillo limosa y arcillosa.
- Suelos de textura muy fina: Contenido de fracción arcilla mayor al 60%.

Para poder ilustrar mejor la anterior información, se realiza el siguiente mapa (Ilustración 3-1) donde se señalan los diferentes grupos texturales texturales con distintos colores.

Ilustración 3-1. Zonas de muestreo, grupos texturales.



Fuente: propia.

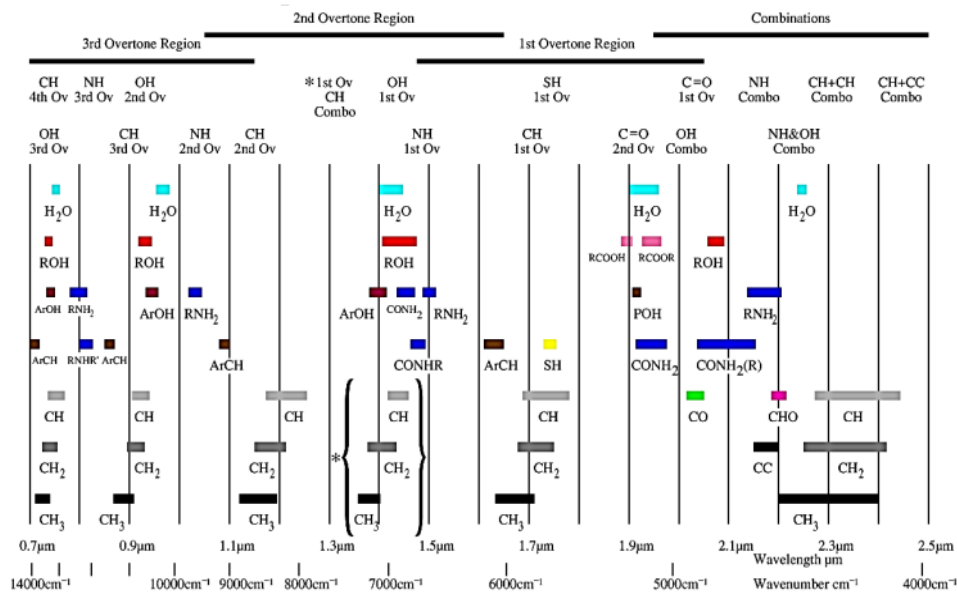
De acuerdo con lo encontrado en este estudio y con lo catalogado por el IGAC, Colombia se compone principalmente de grupos texturales de suelos de textura media (55, 8%) en departamentos como Cundinamarca, Huila, la Guajira, Meta, Nariño, Santander, Tolima y Valle del cauca. Seguido de suelos de textura gruesa (18%) en departamentos como el Atlántico y Caquetá. De textura fina (16,2%) y suelos de textura muy fina en un 6,4%. Sin embargo, estos conceptos no son excluyentes y se puede presentar los 4 grupos texturales a lo largo y ancho del país, lo cual quiere decir que para este estudio se garantiza variabilidad en el contenido textural y de las propiedades químicas del suelo estudiado. Por ejemplo, como lo señala Varón (2016), para el Centro de investigación Agroindustrial Marengo predominan las texturas finas con contenidos de arcilla superiores al 35%.

3.4 Análisis NIR

3.4.1 Análisis cualitativo de las zonas de estudio a partir de firmas espectrales

El análisis cualitativo sin duda brinda un primer acercamiento de lo que se puede encontrar en el suelo a través de la interpretación cuantitativa, de esta manera se determinan características representativas en las firmas espectrales según las bandas predominantes en función de la longitud de onda (Figura 3-9), como por ejemplo la longitud de onda cercana a 1500 nm o 1.5 μm indica presencia de grupos O-H.

Figura 3-9. Bandas de absorción del Infrarrojo Cercano –NIR.

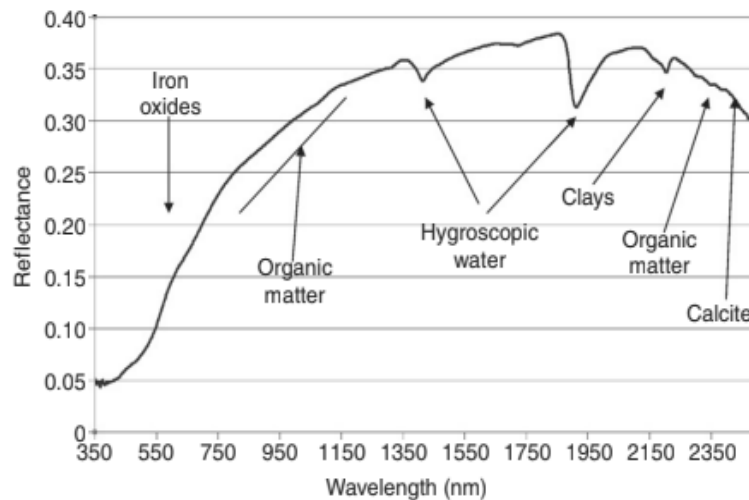


Fuente: Carranza, 2019.

Otras de las características físicas que se puede determinar a simple vista es el caso de la reflectancia en los niveles de 0,3 - 0,4, con longitudes de onda entre 1450 nm -1900 nm se puede encontrar contenidos de agua higroscópica en la muestra del suelo, y para las

longitudes de onda de 2150 nm – 2350 nm hay probabilidades de encontrar contenidos de arcilla, materia orgánica y calcitas, como lo muestra la Figura 3-9.

Figura 3-9. Un espectro de suelo (Haploxeralf) que representa los principales cromóforos en los suelos.

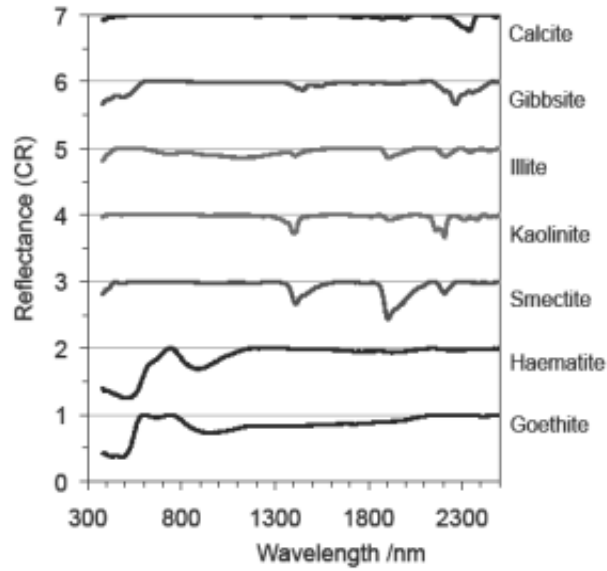


Fuente: Imaging Spectrometry for Soil Applications.

Al igual que en lo anterior mencionado, en la figura 3-10, se muestran características tanto de la longitud de onda como el coeficiente de reflectancia de espectros de suelo, haciendo referencia a la presencia de minerales, como caolinita y esmética que se tendrán en cuenta para este estudio.

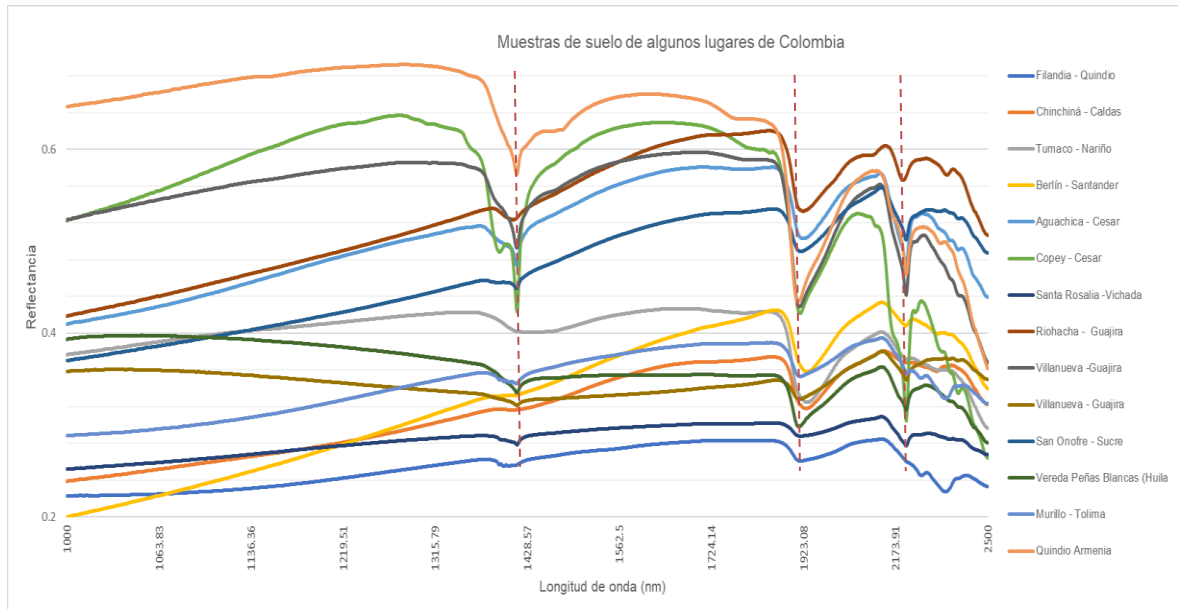
Lo anterior, es confirmado con lo encontrado en las firmas espectrales tomadas para las zonas de interés, allí se observa que en rangos de reflectancia cercanos a 0,2 son suelos con presencia de materia orgánica (MO), además de ser suelos oscuros, como los suelos de Murillo, Berlín, entre otros que se muestran en la Figura 3-11, lo que denota una mayor absorbancia. Cuando las curvas inician cerca de niveles de reflectancia de 0,6 – 0,7; suelen ser suelos claros con poca capacidad de absorber radiación, como los suelos de Cuenca Chinchiná (Caldas), Copey (Cesar), Guajira – Figuras 3-11 y 3-12 (b), esto se puede corroborar con los resultados de los cromatogramas (Ver sección 3-1 y Anexo A). Donde se señala la variación de MO y la interpretación de los colores.

Figura 3-10. Espectros de minerales de suelo común con remoción del continuo.



Fuente: Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. Steinberg et al, 2010.

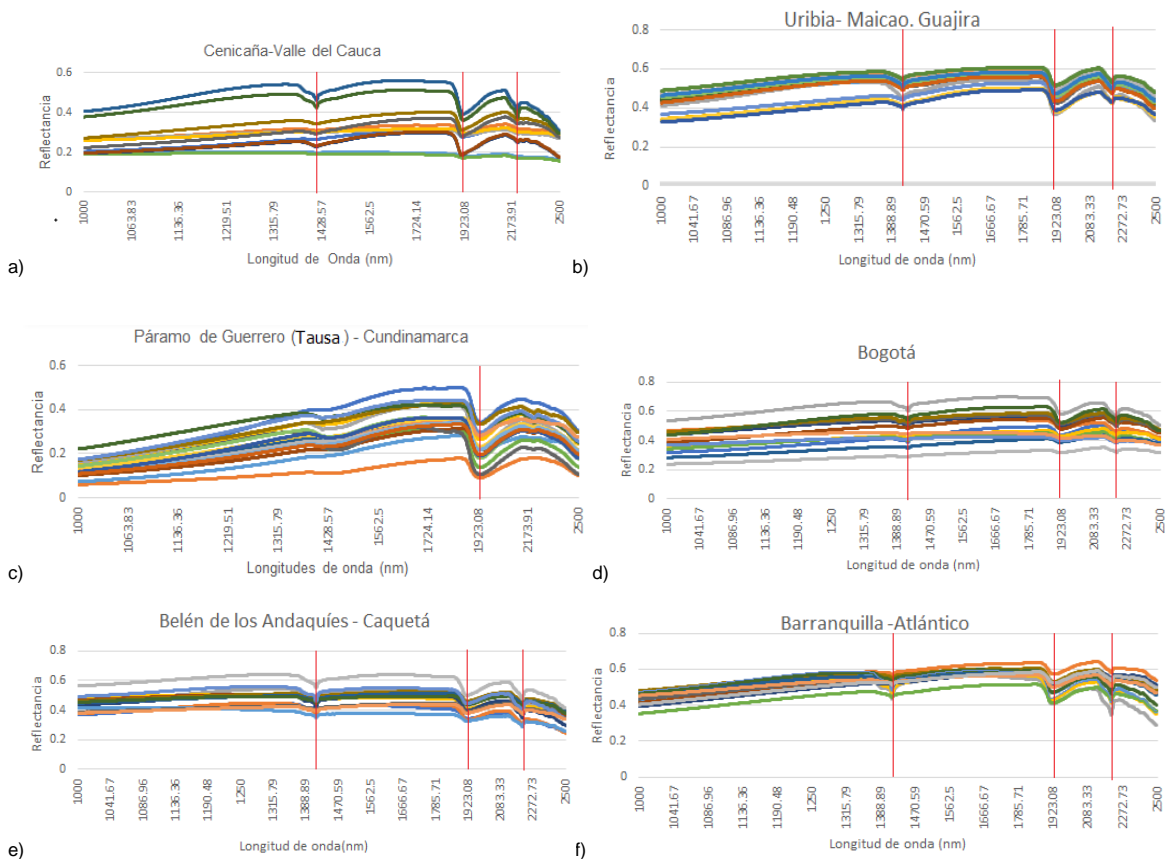
Figura 3-11. Firmas espectrales de las muestras de distintos suelos de Colombia.

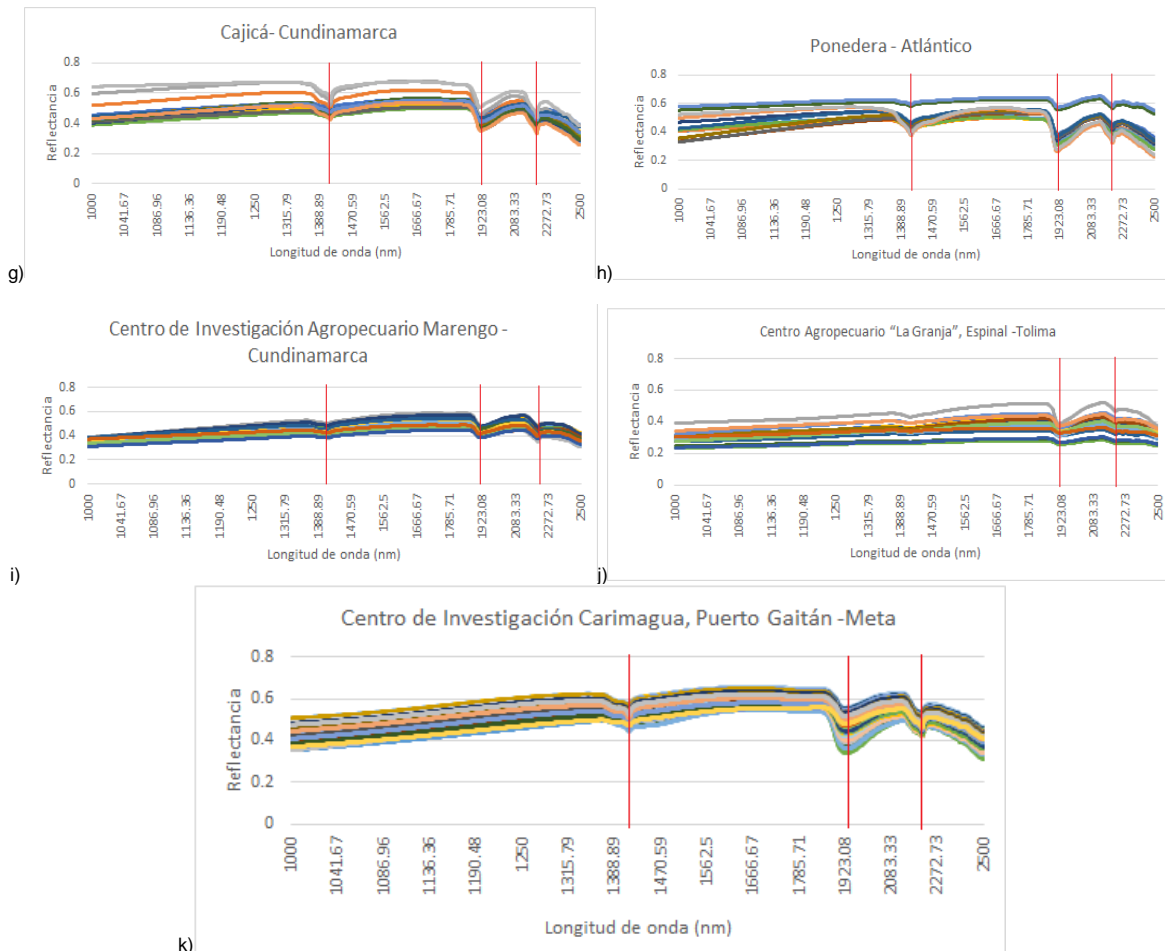


Fuente: Propia.

Se reconoce que en la longitud de onda 1410 nm hay un valle que señala el grupo - OH, esto en algunas muestras con mayor predominancia que en otras (Figura 3-11); en la longitud de onda próxima a 2000 nm se identifican contenidos de arcilla en 9 muestras provenientes de los departamentos del Cesar, Quindío (Figura 3-11), Cundinamarca (CIAM, Cajicá, Bogotá), en la Figura 3-12 (i, g, d), Meta (k) y Atlántico (b y f). También, se identifica contenidos de materia orgánica en suelos como los del Páramo de Guerrero en Tausa - Cundinamarca (c). Sin embargo, es en la única firma espectral donde no se identifica el contenido de caolinita o arcilla activa.

Figura 3-12. Espectros de muestras de suelo del Cenicaña (a), Uribia- Maicao(b), Páramo de Guerrero(c), Bogotá (d), Belén de los Andaquíes (e), Barranquilla (f), Cajicá(g), Ponedera (h), CIAM (i), Espinal (j), Carimagua (k).





Fuente: Propia.

En conclusión, la detección de los contenidos de arena, limo y arcilla se basa en las características de absorción y reflectancia de la radiación en el rango del NIR. Cada tipo de suelo y mineral tiene patrones de absorción y reflectancia únicos en diferentes longitudes de onda. En general, se pueden observar patrones en las longitudes de onda alrededor de 1900-2200 nm para contenidos de arcilla. Estas bandas de absorción están asociadas con las vibraciones moleculares de los minerales y las partículas del suelo, que varían según su composición y tamaño.

En cuanto a la detección de minerales como la caolinita, se pueden observar características espectrales específicas en el rango del NIR. La caolinita tiene una banda de absorción característica alrededor de 2200 nm como se denotó anteriormente en las

muestras de suelo del Centro de Investigación Carimagua en el departamento del Meta, entre otras.

3.4.2 Modelos de calibración obtenidos para distintas propiedades del suelo en las zonas de estudio

Teniendo en cuenta que algunas de las muestras obtenidas tenían resultados de laboratorio bajo las mismas técnicas, se dispuso este estudio con el fin de evaluar la capacidad de la NIR en la estimación de dichas propiedades.

Para hacer los modelos de calibración, inicialmente se realiza la estadística descriptiva, usando medidas de tendencia central y de variabilidad (Tabla 3.5). Con esto se garantiza que las muestras tienen una alta variabilidad, especialmente en las propiedades como Mg, Na y BT, para las cuales sus valores son los mayores en el Coeficiente de Variación (CV).

Tabla 3-5. Estadística descriptiva para distintas propiedades de las zonas de estudio.

Propiedad	Lugares	X	\bar{x}	Med.	Máx.	Mín.	SD	CV	Asimetría	Curtosis
A_B	Todas las zonas	282	56,89	59,89	94	4,8	19,47	34,22	-0,35	-0,65
L_B		282	26,51	26	70	0	12,51	47,18	0,15	-0,53
Ar_B		275	16,61	12	76,5	0	13,06	78,61	1,65	3,21
CO	Carimagua, Ponedera, Cajicá, B/quilla, Belén de los Andaquíes, Guajira	179	1,20	1,17	3,24	0,06	0,68	56,54	0,39	0,01
pH	Ponedera, Cajicá,	92	5,91	5,90	7,82	4,26	0,94	15,96	0,01	-1,05
Ca	B/quilla,	92	6,08	4,21	21,74	0,06	5,38	88,43	0,75	-0,46
Mg	Belén de los Andaquíes,	89	2,82	1,51	11,94	1,51	3,27	115,03	1,34	0,64
K	Guajira, Cenicaña	90	0,25	0,21	0,75	0,02	0,17	68,5	0,76	0,07

Na	Ponedera, Cajicá, B/quilla, Belén de los Andaquíes, Cenicaña.	60	0,16	0,07	0,64	0,01	0,18	110,66	1,20	0,07
BT	Ponedera, Cajicá, B/quilla, Belén de los Andaquíes.	57	8,46	4,46	30,8	0,16	8,66	102,32	0,820	-0,47

Fuente: Propia.

Para el procesamiento de los datos se hizo uso del programa Parles, el cual proporciona a partir de una serie de pasos la estadística para seleccionar el modelo de calibración adecuado para cada caso. En este se tiene en cuenta el modelo de Regresión de Mínimos Cuadrados Parciales (PLSR), cada set de datos fue procesados mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) tomando 5 iteraciones.

Para la validación del modelo (Tabla 3-6) se tendrá en cuenta el coeficiente de determinación (R^2), raíz del error medio cuadrático de la predicción (RMSE), error medio (ME), desviación estándar del error (SDE) y la desviación residual de la predicción (RPD).

Tabla 3-6. Modelos de validación obtenidos para cada propiedad.

Propiedad	Tratamiento/ PCA -5 Factores PLSR	R^2	R^2 ajustado	RMSE	ME	SDE	RPD
A _B [%]	<i>No transformation, Wavelet detrending, Median filter, 1st derivate, Mean center</i>	0,864	0,864	11,471	-0,231	11,489	2,71

L _ B [%]	<i>No transformation, Wavelet detrending, median filter, 1st derivate 15</i>	0,843	0,842	10,227	0,237	10,242	2,47
Ar _ B [%]	<i>No transformation, SNV with wavelet detrending, median filter, 1st derivate, Mean center 13</i>	0,636	0,635	7,161	-0,091	7,174	1,64
Carbono Orgánico (CO) [%]	<i>No transformation, Wavelet detrending, Median filter, 1st derivate, Mean center 13</i>	0,814	0,813	0,294	-0,001	0,295	2,31
pH	<i>No transformation, MSC, Median filter, 1st derivate, Mean center 13</i>	0,755	0,752	0,467	-0,012	0,470	2,02
Calcio (Ca) [cmol(+)/kg]	<i>No transformation, SNV, Wavelet filter, 1st derivate, mean center 8</i>	0,723	0,720	2,838	-0,002	2,854	1,90
Magnesio (Mg) [cmol(+)/kg]	<i>No transformation, MSC, Median filter, 1st derivate, No pretreatment 8</i>	0,806	0,804	1,441	-0,021	1,449	2,27
Potasio (K) [cmol(+)/kg]	<i>No transformation, SNV with wavelet detrending, no de- noising, 1st derivate, Mean center 17</i>	0,428	0,422	0,134	-0,003	0,135	1,27
Sodio (Na) [cmol(+)/kg]	<i>No transformation, SNV with wavelet detrending, median filter, 1st derivate, No pretreatment 7</i>	0,683	0,677	0,104	-0,004	0,105	1,75

Bases Totales (BT) [cmol(+)/kg]	<i>No transformation, Wavelet detrending, Median filter, 1st derivate, No pretreatment 10</i>	0,896	0,894	2,802	-0,058	2,826	3,09
-------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-------	-------	--------	-------	------

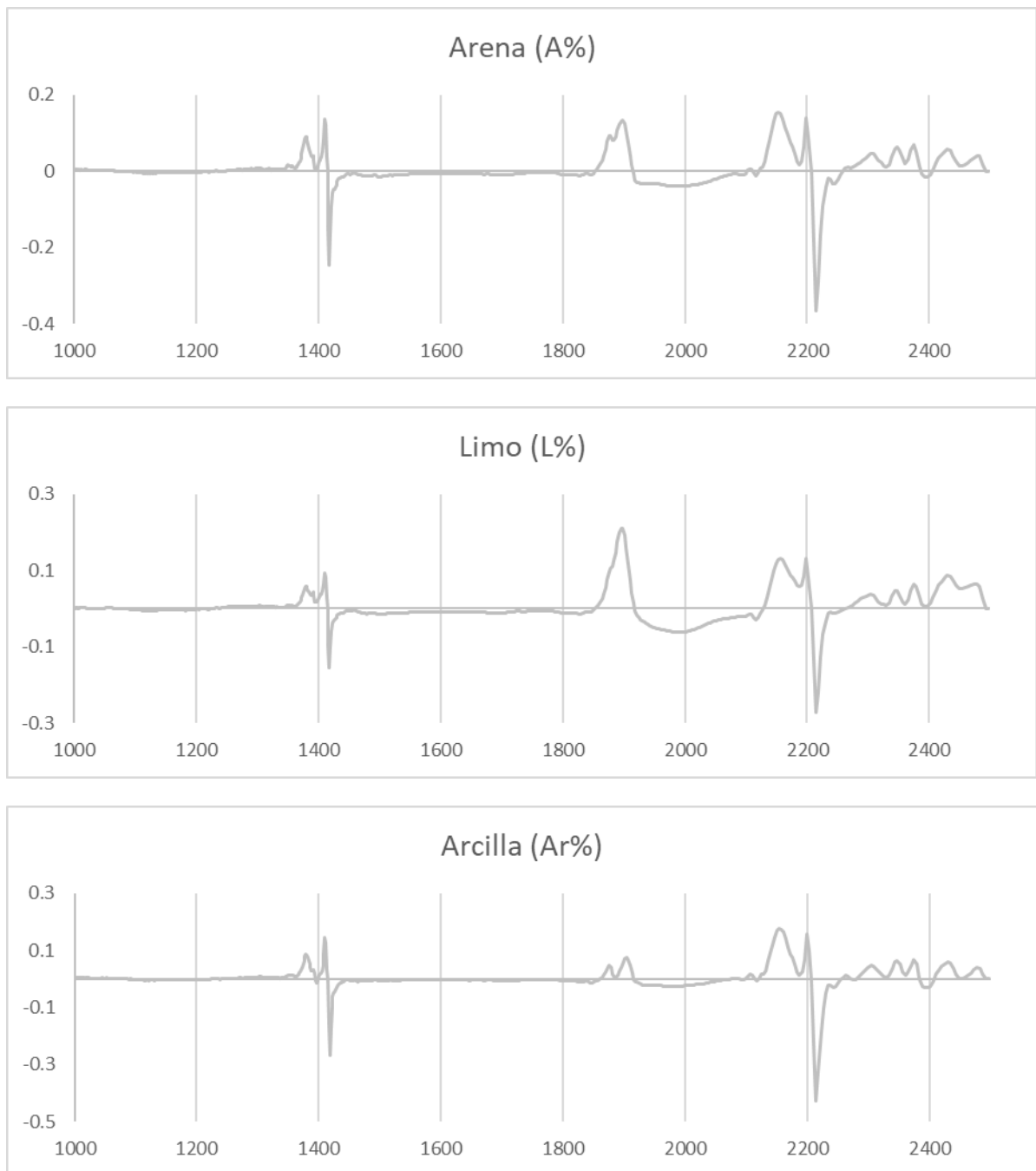
Fuente: Propia.

Para cada propiedad se realizaron las combinaciones necesarias, con el fin de generar el mejor modelo, en cuyos casos no se genera una transformación, es decir se sigue trabajando con reflectancia. En el procesamiento se hacen los ajustes necesarios con el fin de que las líneas base se suavicen por el ruido que se pueda encontrar en cada set. Además, se garantiza acentuar los valles y picos a través de la 1ra derivada, en algunos casos se aplica pretratamiento, como se señala en la tabla 3-6.

Para poder seleccionar el mejor modelo de estimación se debe tener en cuenta el mayor valor de R^2 , valores superiores a 2 en el RPD y el menor RMSE posible, en la Tabla 3-6, se observa que para el caso del potasio (K) se genera un modelo poco representativo, esto se debe a que este macronutriente se encuentra en el suelo en pocas cantidades y a veces se puede solapar con otras propiedades. Para las propiedades de Ar, pH, Ca, Na son modelos regulares y excelentes para los casos de A, L, CO, Mg y BT, lo anterior teniendo en cuenta el R^2 y el RPD según la clasificación propuesta por Shenk y Westerhaus (1996), y Viscarra-Rossel et al., (2006) respectivamente.

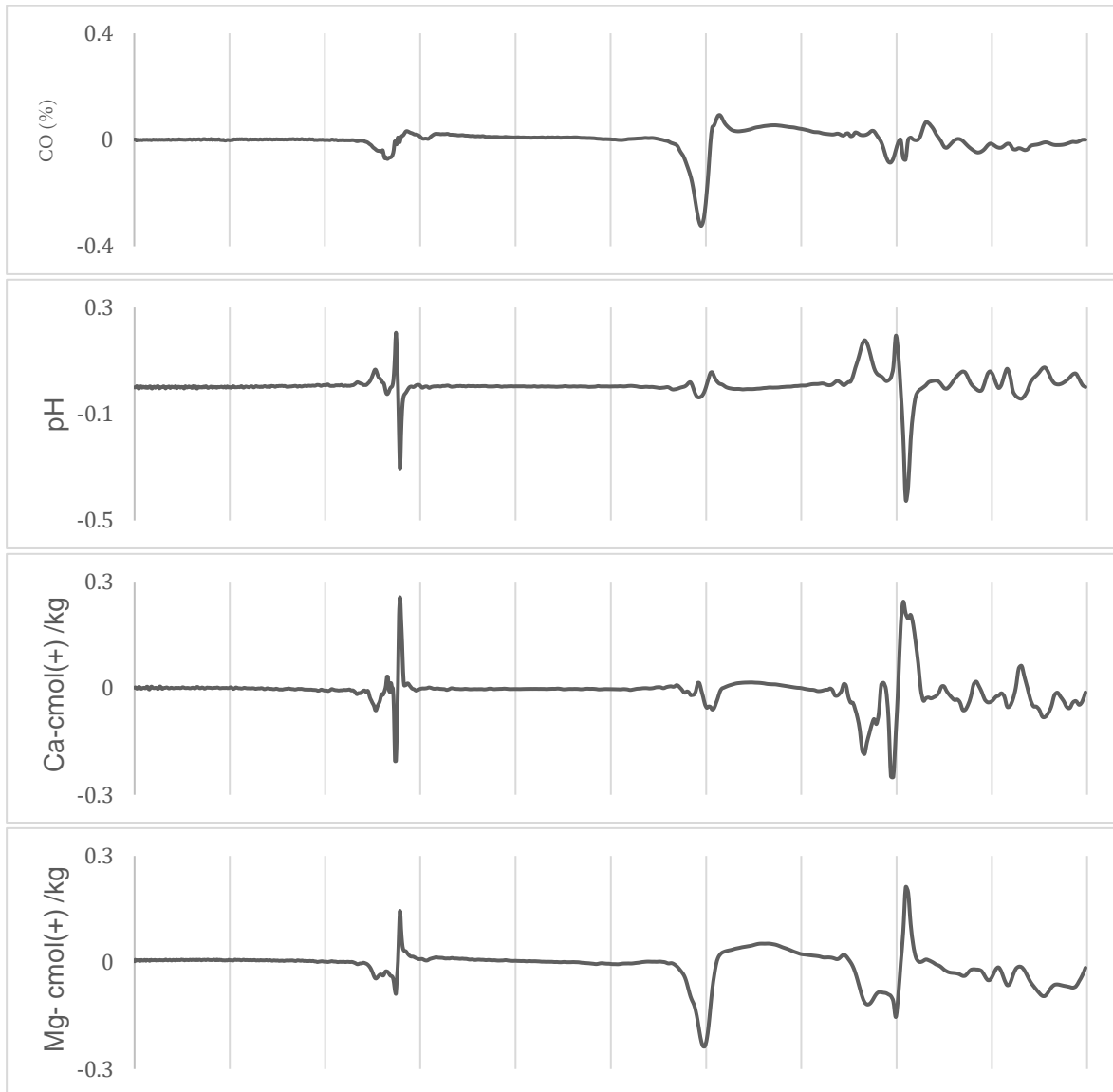
En la Figura 3-13, se representan los *loadings* del primer componente principal para las propiedades de Arena, limo y arcilla a partir de la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR). Para cada propiedad (Figura 3-13 y Figura 3-14) los *loadings* fueron centrados con un eje correspondiente a cero. Los valles negativos indican correlación positiva con la predicción, es por lo que encontramos similitudes entre las propiedades en las longitudes de onda de 1450 nm y 2200 nm aproximadamente. Por el contrario, cuando se tienen pico predominantes y positivos, esto conduce a correlaciones negativas con la predicción.

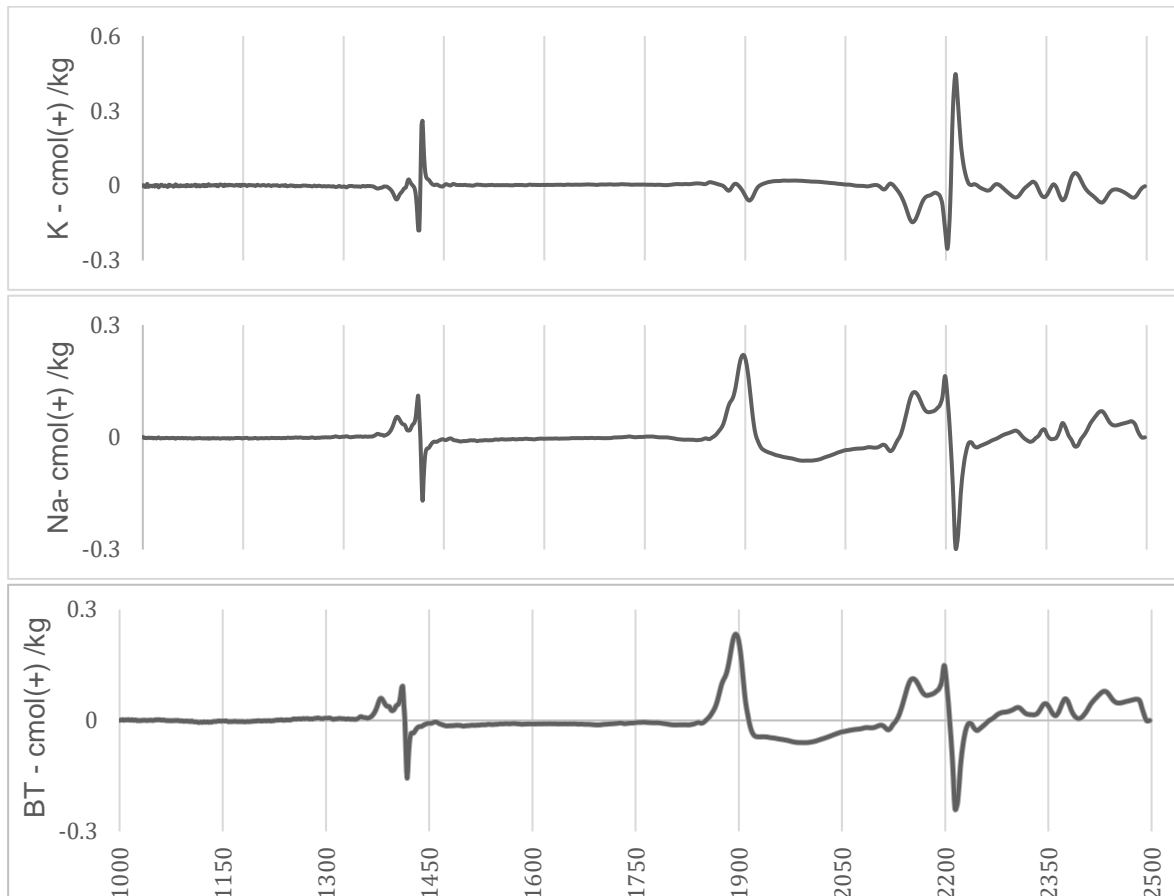
Figura 3-13. Loadings de las propiedades Arena, Limo y Arcilla con el primer componente principal (CPA-1).



Fuente: Propia – Parles y Excel.

Figura 3-14. Loadings de las propiedades Carbono Orgánico -CO (%), pH, Calcio-Ca (cmol(+)/kg), Magnesio-Mg (cmol(+)/kg), Potasio-K (cmol(+)/kg), Sodio-Na (cmol(+)/kg), Bases Totales--BT (cmol(+)/kg) con el primer componente principal (CP-1).





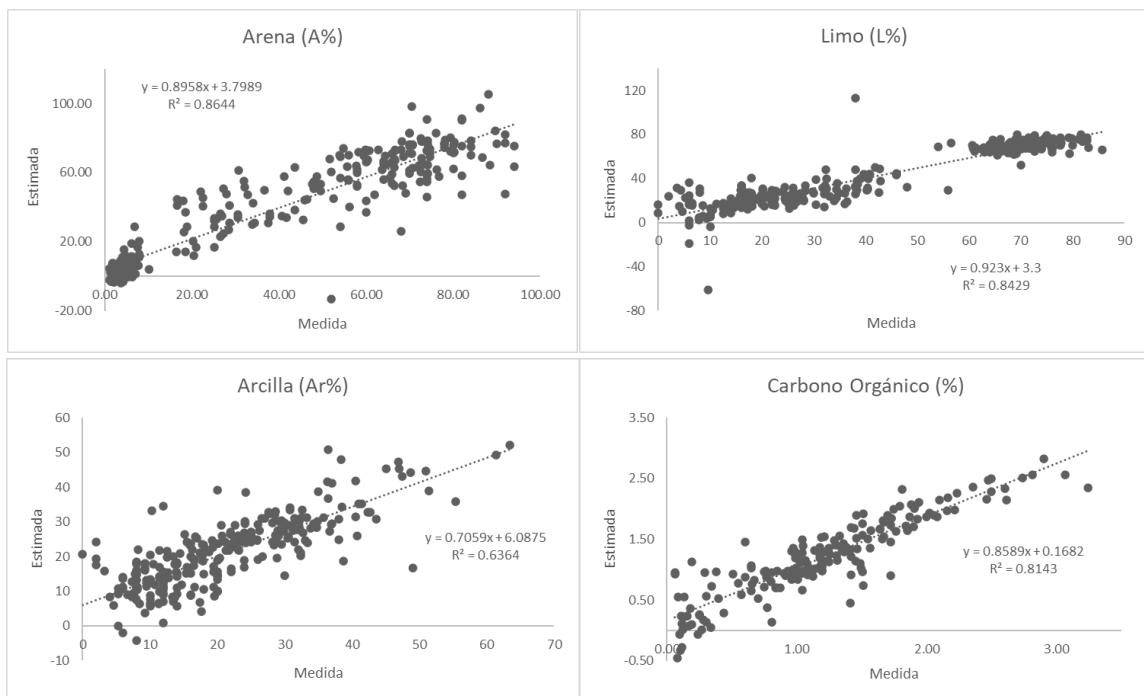
Fuente: Propia – Parles y Excel.

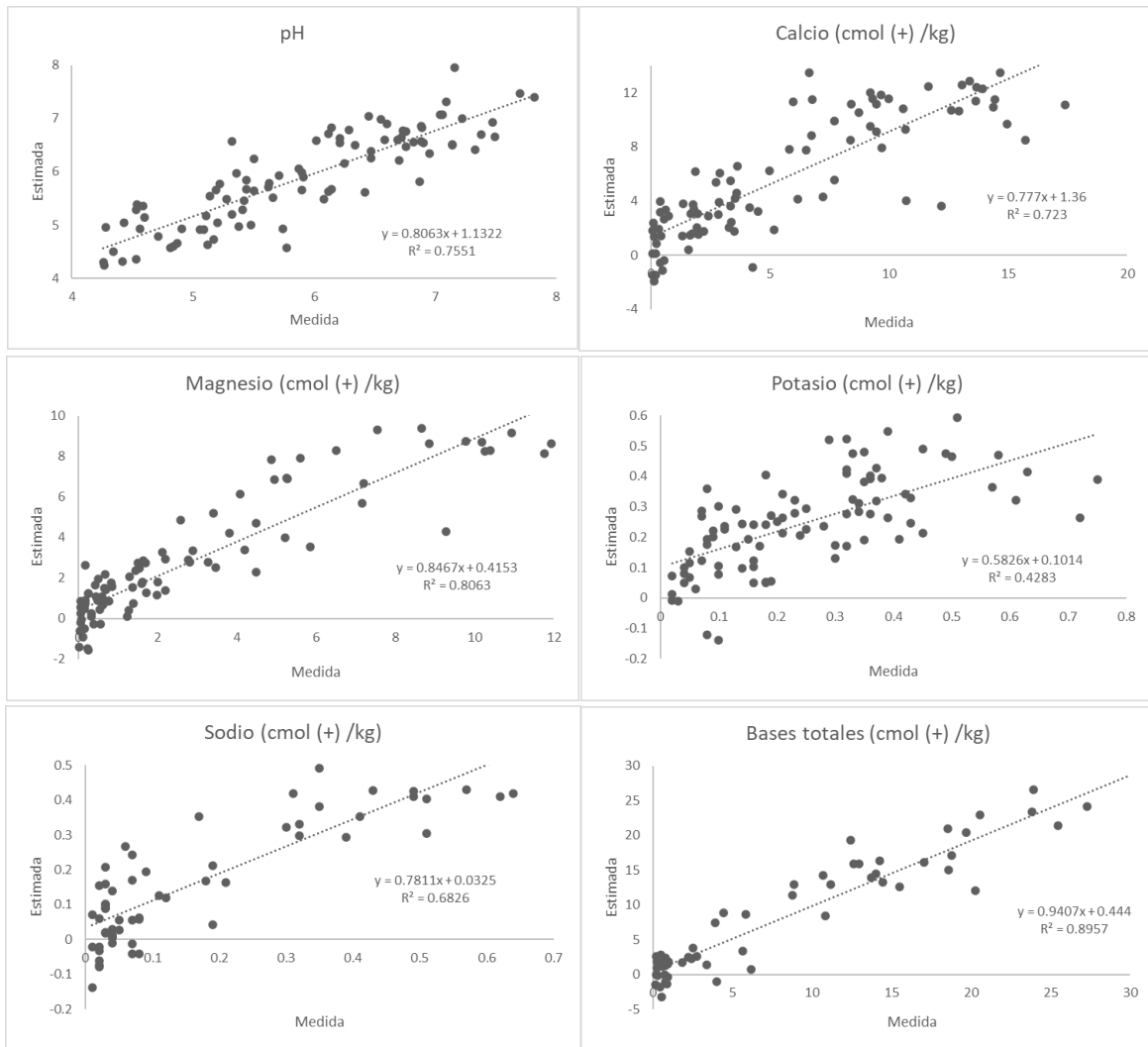
El comportamiento de las regresiones lineales para los modelos de calibración para cada una de las propiedades se representa en la Figura 3-15. Entre las fracciones texturales se evidencia un mejor desempeño de predicción para A y L que para Ar. Esto se puede atribuir al alto coeficiente de variación o la metodología empleada para determinar textura. A pesar de ello, y en comparación con otros estudios los presentes resultados muestran mejor desempeño, Fernández. F (2020) menciona que se tiene poca representatividad en casos donde la Arena y el Limo tienen bajos R^2 y altos RPD, y en donde son suelos mayormente franco-limosos y franco arenosos. Sin embargo, puede ocurrir casos aceptables en el caso de Ar en donde $R^2= 0,76$ y $RPD= 2,25$, siendo superior al encontrado en esta investigación.

Se debe tener en cuenta la cantidad de muestras de este estudio, se encuentran investigaciones donde sus resultados son mejores por la robustez de sus sets de muestras. Sin embargo, a pesar de que en este estudio las propiedades no superen en algunos casos las 100 muestras indica una alta potencialidad para esta técnica y la eficacia con la que cuenta.

En la Figura 3-15, se observa que para las propiedades que presentaron un bajo desempeño representativo en los modelos, las validaciones cruzadas son dispersas, mostrando una baja correspondencia entre los valores medidos y los estimados, lo que garantiza el bajo poder de predicción de los modelos obtenidos.

Figura 3-15. Valores estimados Vs Valores medidos de cada propiedad del suelo.



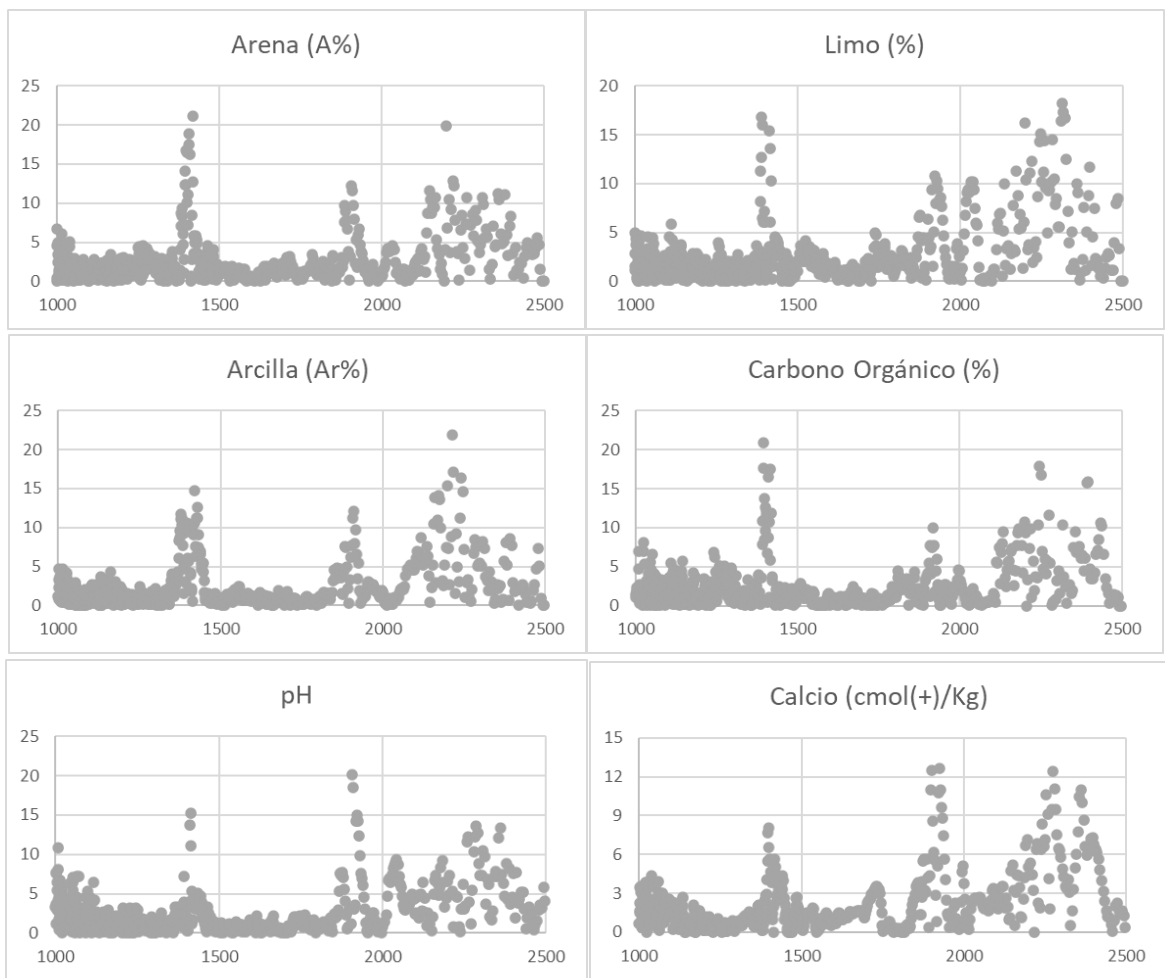


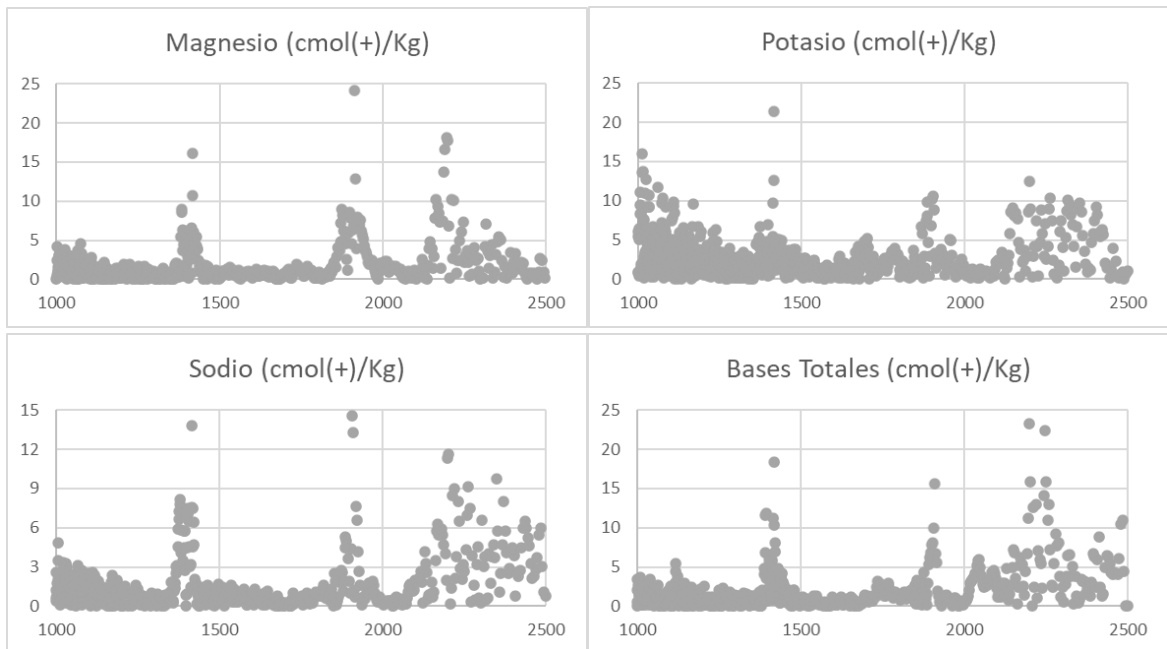
Fuente: Propia – Parles y Excel.

Por medio del concepto de importancia de la variable para la proyección (VIP), se verifica que la estimación de una propiedad es el resultado de una combinación de diferentes variables, cuya incidencia de algunas regiones del espectro es mayor y depende de cada propiedad en particular (Camacho-Tamayo, 2013).

En las figuras donde se representa el VIP con mayor número de picos, se indica que existe un mayor número de longitudes de onda o de regiones que se deben considerar para la estimación de estas propiedades, por ejemplo, en los casos del limo (L) y el calcio (Ca).

Figura 3-16. Variable para la proyección en la respuesta espectral de las propiedades del suelo.





Fuente: Propia – Parles y Excel.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Se demuestra que la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) es un método altamente preciso y rápido en comparación con los métodos de laboratorio convencionales para la predicción de propiedades del suelo. La espectroscopia brinda una estimación tanto cualitativa como cuantitativa, en los resultados obtenidos de las firmas espectrales se puede determinar varias características significativas como la presencia de grupos funcionales OH, además de contenido de arcillas, lo cual da pie a una interpretación que se puede confirmar con los modelos obtenidos.

La espectroscopia de reflectancia difusa o espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) es una técnica rápida y eficiente, a pesar de la cantidad reducida de muestras trabajadas en este estudio se obtuvieron modelos aceptables para la predicción de propiedades como Arena, Limo, Carbono Orgánico, Magnesio y Bases Totales donde se tuvo un $R^2 > 0.8$, demostrando su alto potencial en el desarrollo de estudios de suelo, lo anterior también se debe a la heterogeneidad de las muestras trabajadas. En el caso de la arcilla, pH, Na el modelo es medianamente aceptable ya que el $R^2 > 0,6$, sin embargo, para la propiedad de potasio el R^2 es de 0,4, lo cual indica un modelo inaceptable, esto debido a las pocas cantidades de este macronutriente que se puede detectar en el suelo. En comparación con las técnicas convencionales la espectroscopia es menos dispendiosa con menos impactos negativos al ambiente. Sin embargo, es necesario este tipo de técnicas para poder realizar los modelos, además de conocer el contexto de cada muestra, ya que mejora la predicción y reproducción del proceso reduciendo el Error.

4.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta lo realizado durante este estudio se hacen las siguientes recomendaciones:

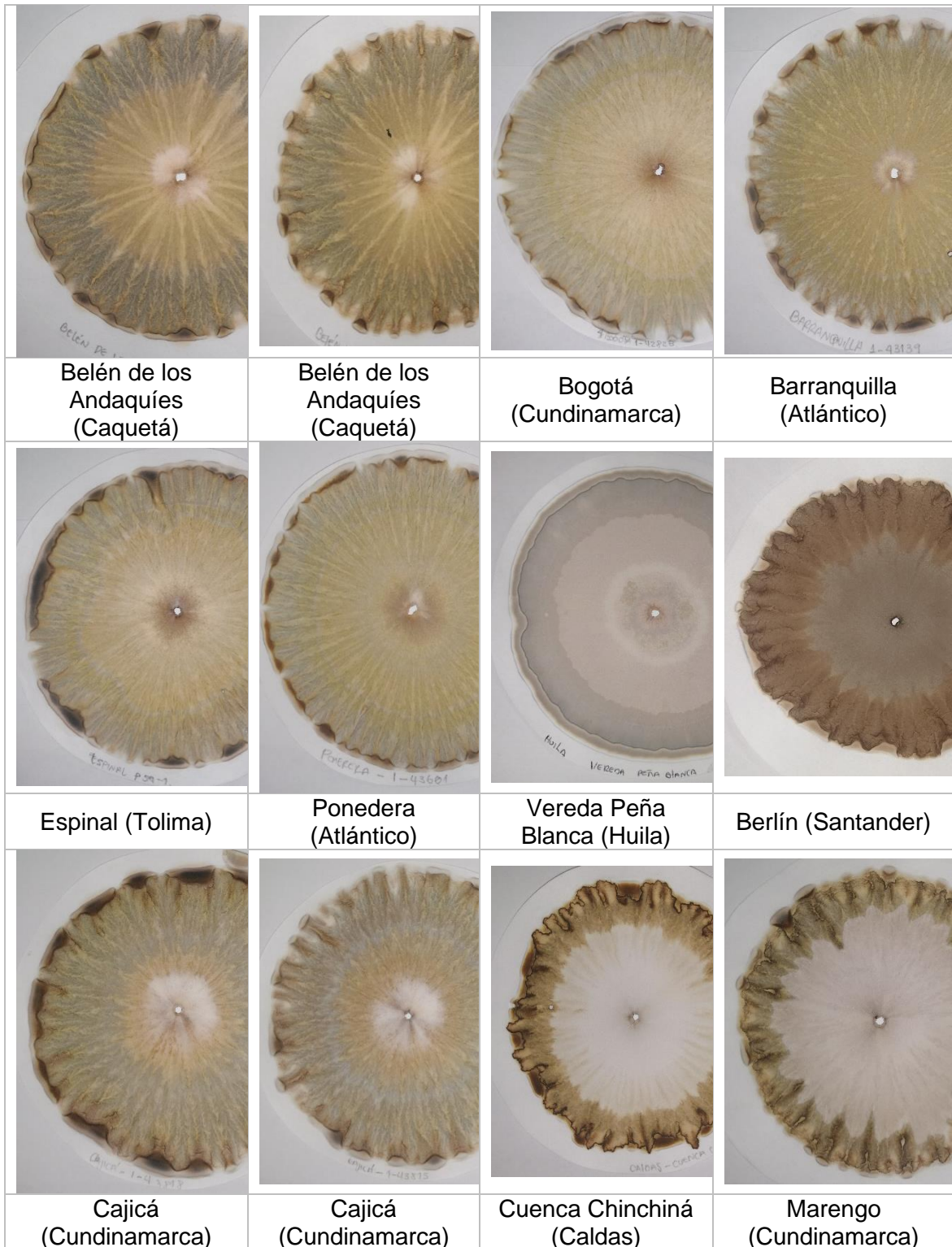
- Generar mayor concientización entorno al suelo como recurso vital, con el fin de garantizar un buen uso y cuidado.
- Con el uso de técnicas de bajo impacto ambiental ya sean tradicionales o alternativas se generan herramientas que interpretan el suelo de forma didáctica y pedagógica.
- Tener en cuenta los factores medioambientales al momento de obtener la muestra, además del diagnóstico efectivo en la toma y el procesamiento de datos.
- Robustecer las bibliotecas espectrales con el fin de conocer e implementar mejores modelos tanto de validación como de calibración.
- Estandarizar procedimientos, con el fin de disminuir las diferencias significativas, ya sea por implementación de diferentes equipos o procesamiento de las muestras.



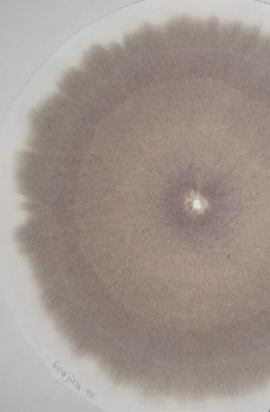


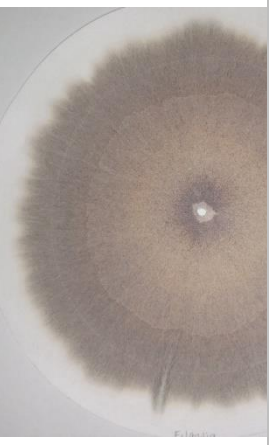






A. Anexo: Cromatografías de las zonas de estudio.













En la Tabla A-1, se detallan las muestras que tuvieron alguna característica descrita por cada zona del cromatograma.

Tabla A-1. Muestras de suelo discriminadas por las zonas del cromatograma.

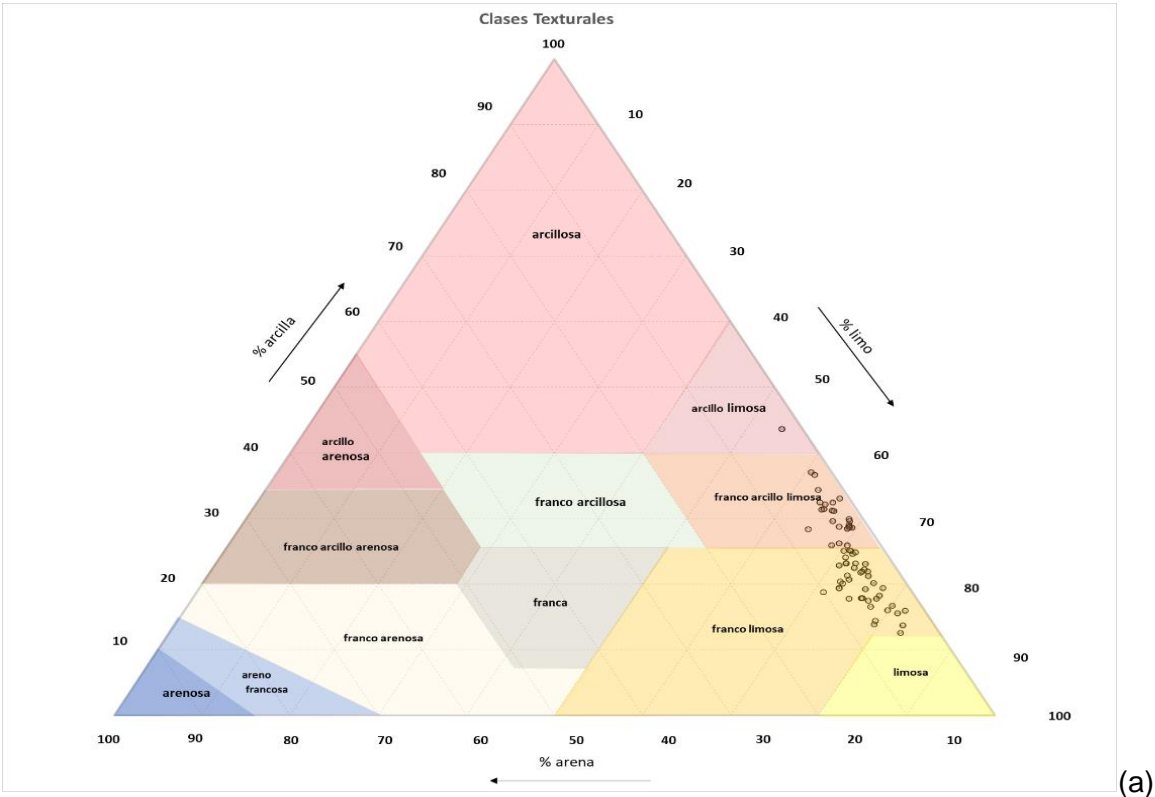
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4
No existe	Ponedera 1-43601, Murillo Cesar-Aguachica, Barranquilla 1-43139, Barranquilla 1-43144, Filandia, Valle del Cauca 20-07 AS Valle del Cauca 45-07AS, Santander Berlín, Vichada Belén de los Andaquies 1-42133, Guajira 15-Maicao, Belén de los Andaquies 1-42135, Carimagua C14, Ponedera 1-43605, Bogotá 1-42828, Espinal P54-1, Ponedera 1-43591, Espinal P02-1, Cesar-Copey, Páramo de Guerrero T1-5, Páramo de Guerrero T3-8, Espinal P19-1, Guajira- Villanueva 399701, Guajira- Villanueva 399667, Quindío, Guajira-Riohacha 401223.	Integrada	Ponedera 1-43601, Carimagua C3-1, Cesar-Aguachica, Cajicá 1-43818, Cajicá 1-43815, Barranquilla 1-43139, Barranquilla 1-43144, Filandia, Valle 20-07 AS, Valle 45-07AS, Cuenca Chinchiná, Caldas 4-07771, Vichada, Belén de los Andaquies 1-42133, Guajira 15-Maicao, Belén de los Andaquies 1-42135, Carimagua A82-1, Carimagua C14, Ponedera 1-43605, Bogotá 1-42828, Espinal P54-1, Ponedera 1-43591, Espinal P02-1, Cesar-Copey, Espinal P19-1, Guajira- Villanueva 399701, Guajira- Villanueva 399667, Quindío, Guajira-Riohacha 401223.	Escasa	Nariño, Marengo L2P4-1, Caldas-Cuenca Chinchiná, Marengo L4P4-1, Páramo de Guerrero T1-5, Páramo de Guerrero T3-8.	Lunares	Carimagua C3-1, Marengo L4P4-1, Belén de los Andaquies 1-42135, Carimagua A82-1, Carimagua C14
Blanco	Carimagua C3-1, Caldas-Cuenca Chinchiná, Nariño	Aislada	Murillo (zona reducida), Guajira 6, Cesar-Aguachica, Guajira 21- Uribia	No activa	Nariño-Tumaco 409048, Murillo, Guajira 6, Valle 20-07 AS, Valle 45-07AS, Santander, - Berlín 411839, Belén de los Andaquies 1-42133, Marengo L12P3-1, Belén de los Andaquies 1-42135, Ponedera 1-43591, Espinal P02-1, Cesar-Copey, Guajira 21- Uribia.	Circular plana	Murillo, Cesar-Aguachica, Barranquilla 1-43144, Filandia, Valle del Cauca 45-07AS, Vichada, Guajira 15-Maicao, Ponedera 1-43605, Bogotá 1-42828, Espinal P54-1, Ponedera 1-43591, Espinal P02-1, Cesar-Copey, Espinal P19-1, Guajira- Villanueva 399701, Guajira- Villanueva 399667, Quindío, Guajira-Riohacha 401223
Crema	Nariño-Tumaco 409048, Guajira 6, Cajicá 1-43818, Cajicá 1-43815, Marengo L2P4-1, Cuenca Chinchiná, Caldas 4-07771 Marengo L4P4-1, Marengo L12P3-1, Carimagua A82-1, Guajira 21-Uribia.	No existe	Nariño, Santander - Berlín 411839, Nariño-Tumaco 409048, Marengo L2P4-1, Caldas-Cuenca Chinchiná, Marengo L4P4-1, Marengo L12P3-1, Páramo de Guerrero T1-5, Páramo de Guerrero T3-8.	Integrada	Ponedera 1-43601, Carimagua C3-1, Cesar-Aguachica, Cajicá 1-43818, Cajicá 1-43815, Barranquilla 1-43139, Barranquilla 1-43144, Filandia, Cuenca Chinchiná, Caldas 4-07771, Vichada, Guajira 15-Maicao, Carimagua A82-1, Carimagua C14, Ponedera 1-43605, Bogotá 1-42828, Espinal P54-1, Espinal P19-1, Guajira- Villanueva 399701, Guajira- Villanueva 399667, Quindío, Guajira-Riohacha 401223.	Dientes o granos	Ponedera 1-43601, Nariño-Tumaco 409048, Cajicá 1-43818, Nariño, Cajicá 1-43815, Barranquilla 1-43139, Marengo L2P4-1, Santander, Berlín 411839, Cuenca Chinchiná, Caldas 4-07771, Belén de los Andaquies 1-42133, Caldas-Cuenca Chinchiná, Marengo L12P3-1, Páramo de Guerrero T1-5, Páramo de Guerrero T3-8.
						Puntigado	Guajira 6, Valle del Cauca 20-07 AS, Guajira 21- Uribia

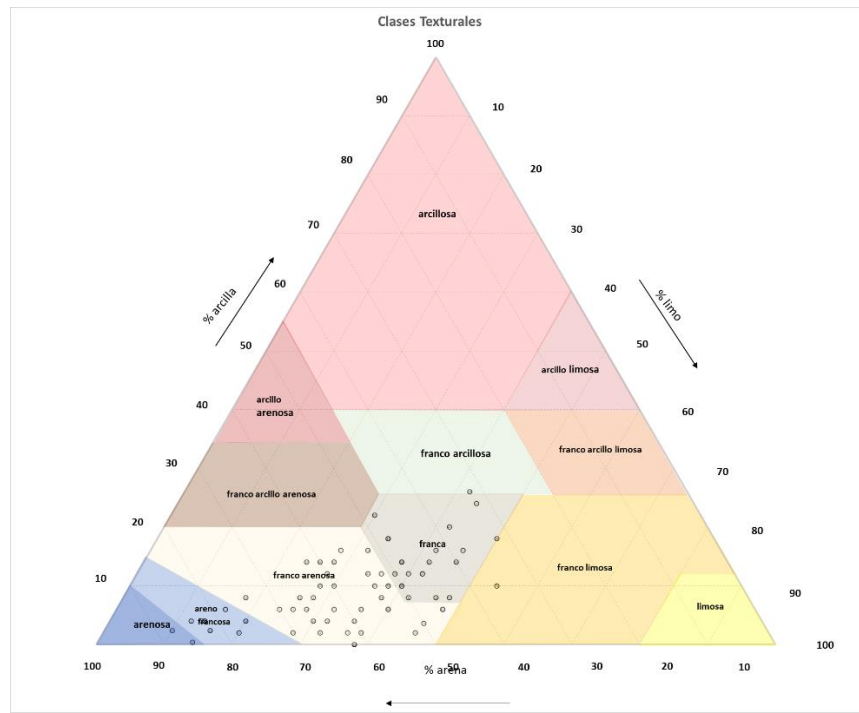
Figura A-1. Fotografías de los cromatogramas de las zonas de estudio.

			
Marengo (Cundinamarca)	Tumaco (Nariño)	Maicao (Guajira)	Cenicaña - Valle del Cauca
			
Cenicaña (Valle del Cauca)	Filandia (Quindío)	Murillo (Tolima)	Ponedera (Atlántico)
			
Carimagua-Puerto Gaitán (Meta)	CIAM (Cundinamarca)	Cajicá (Cundinamarca)	Uribia (Guajira)

			
Uribia (Guajira)	Carimagua- Puerto Gaitán (Meta)	Aguachica (Cesar)	Espinal (Tolima)
			
Copey (Cesar)	Ponedera (Atlántico)	Villanueva (Guajira)	Villanueva (Guajira)
			
Santa Rosalía (Vichada)	Espinal (Tolima)	Barranquilla (Atlántico)	Riohacha (Guajira)

B. Anexo: Triángulos texturales para cada zona de estudio.



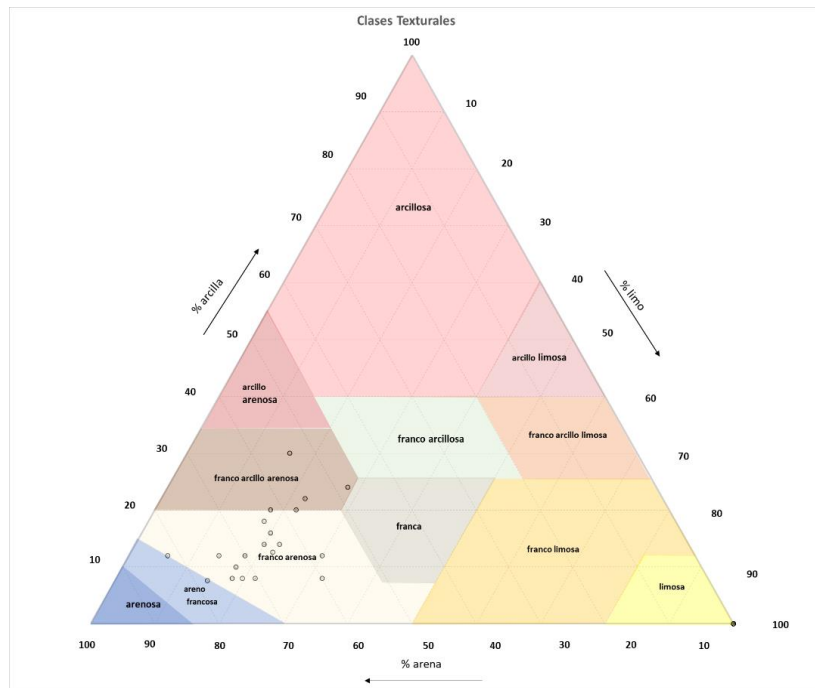


(b)

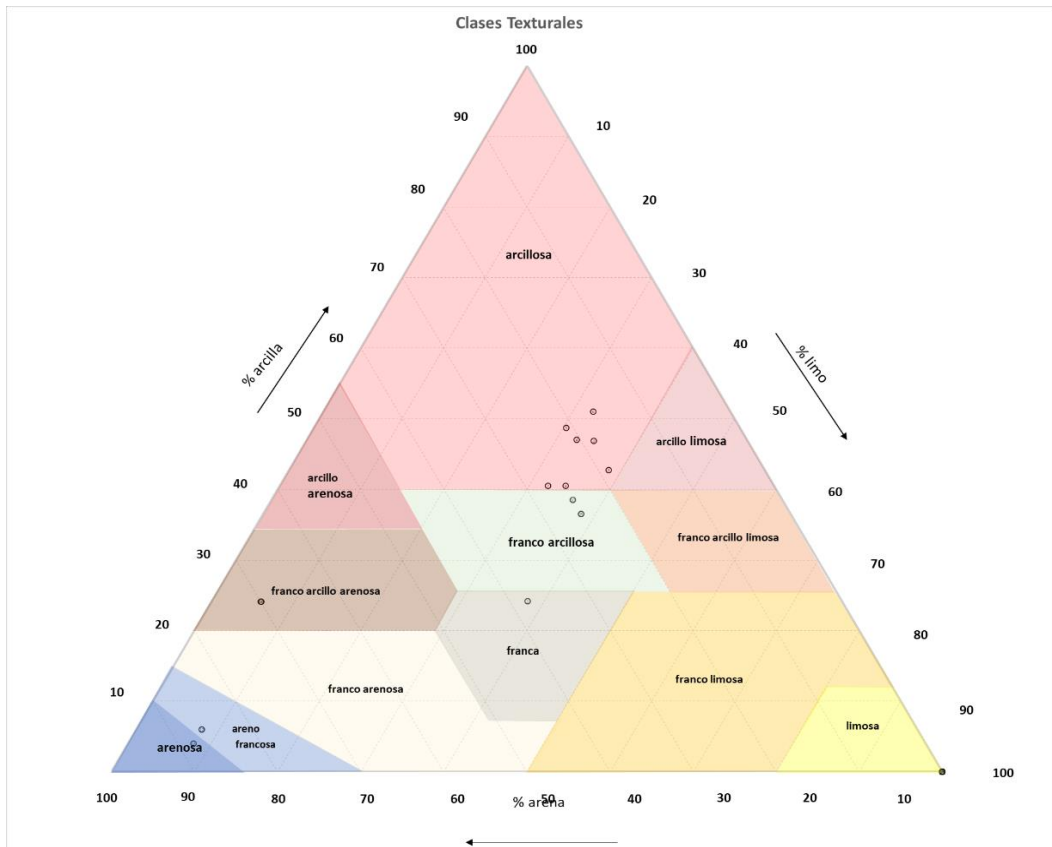
Centro de Investigación Carimagua. Puerto Gaitán (Meta), a) Método de Bouyoucos b) Método de Pipeta



Centro Agropecuario "La Granja" Espinal (Tolima)

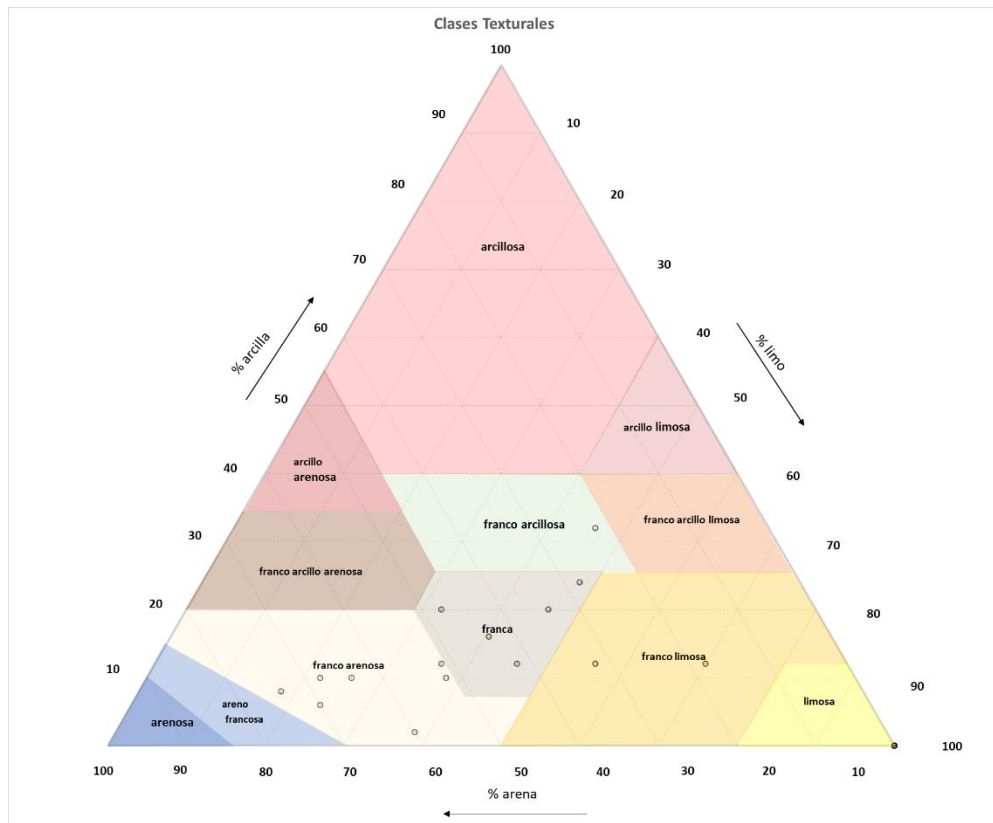


Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CIAM).
Mosquera (Cundinamarca)

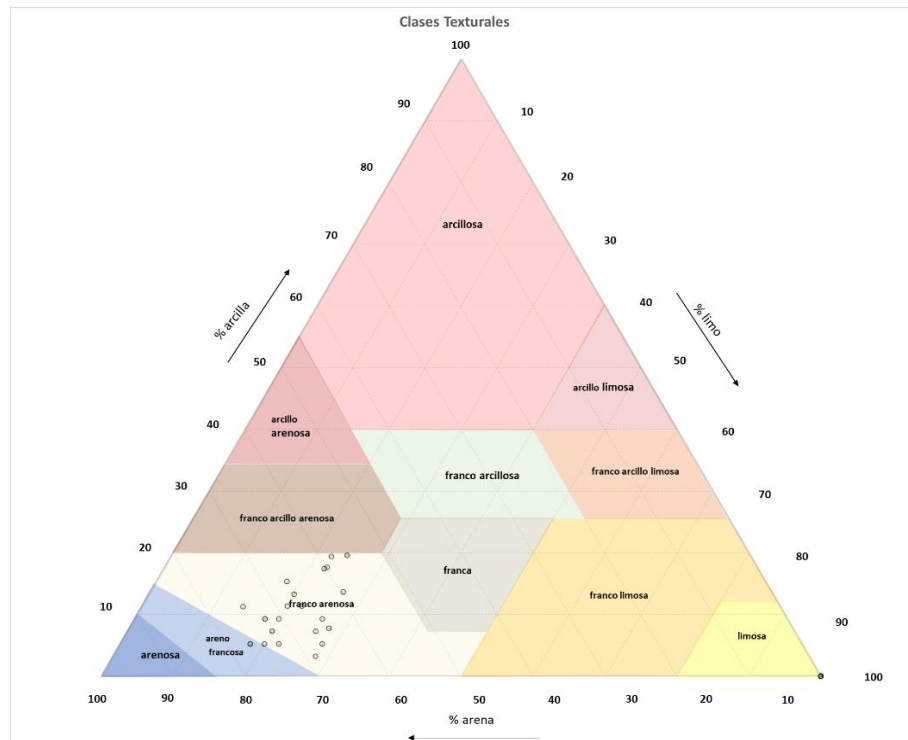




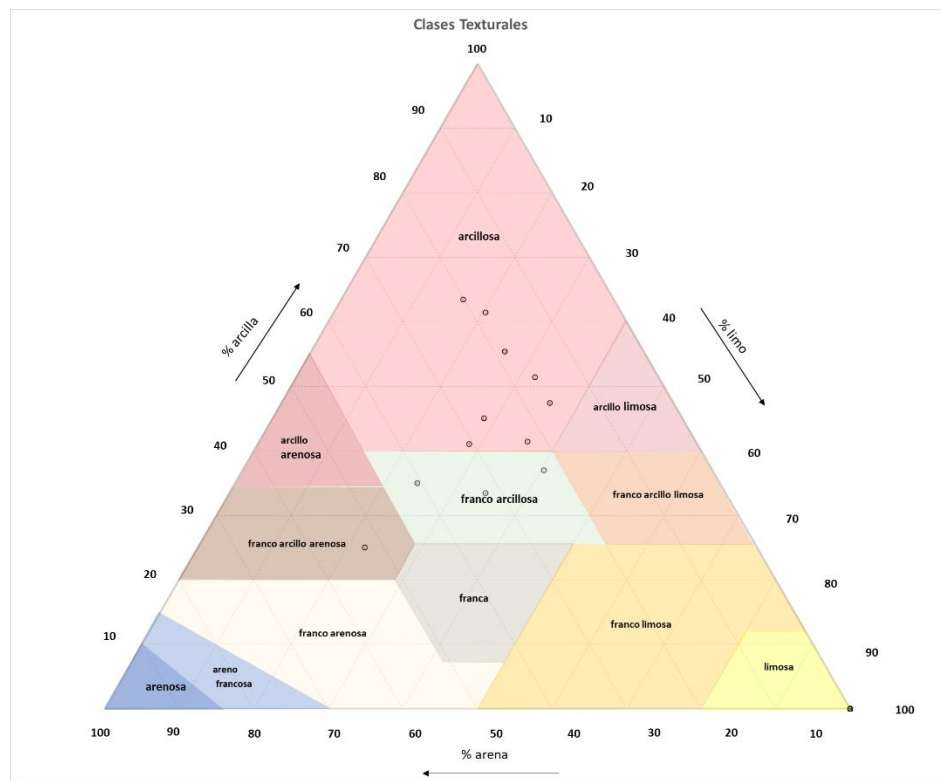
Belén de los Andaquíes (Caquetá)



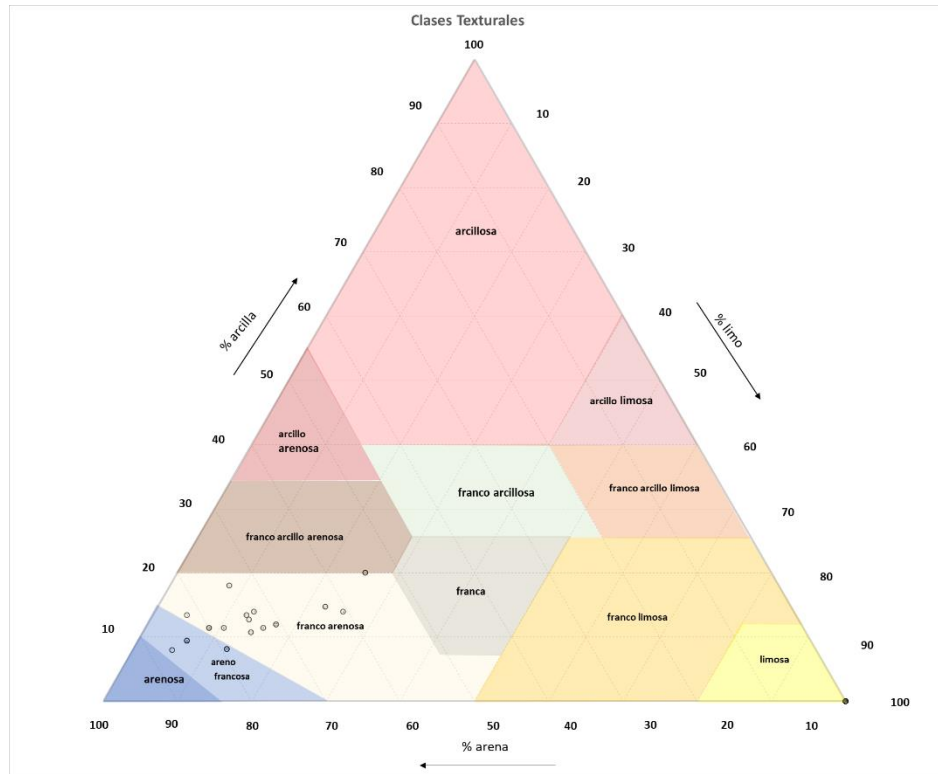
Bogotá (Bogotá)



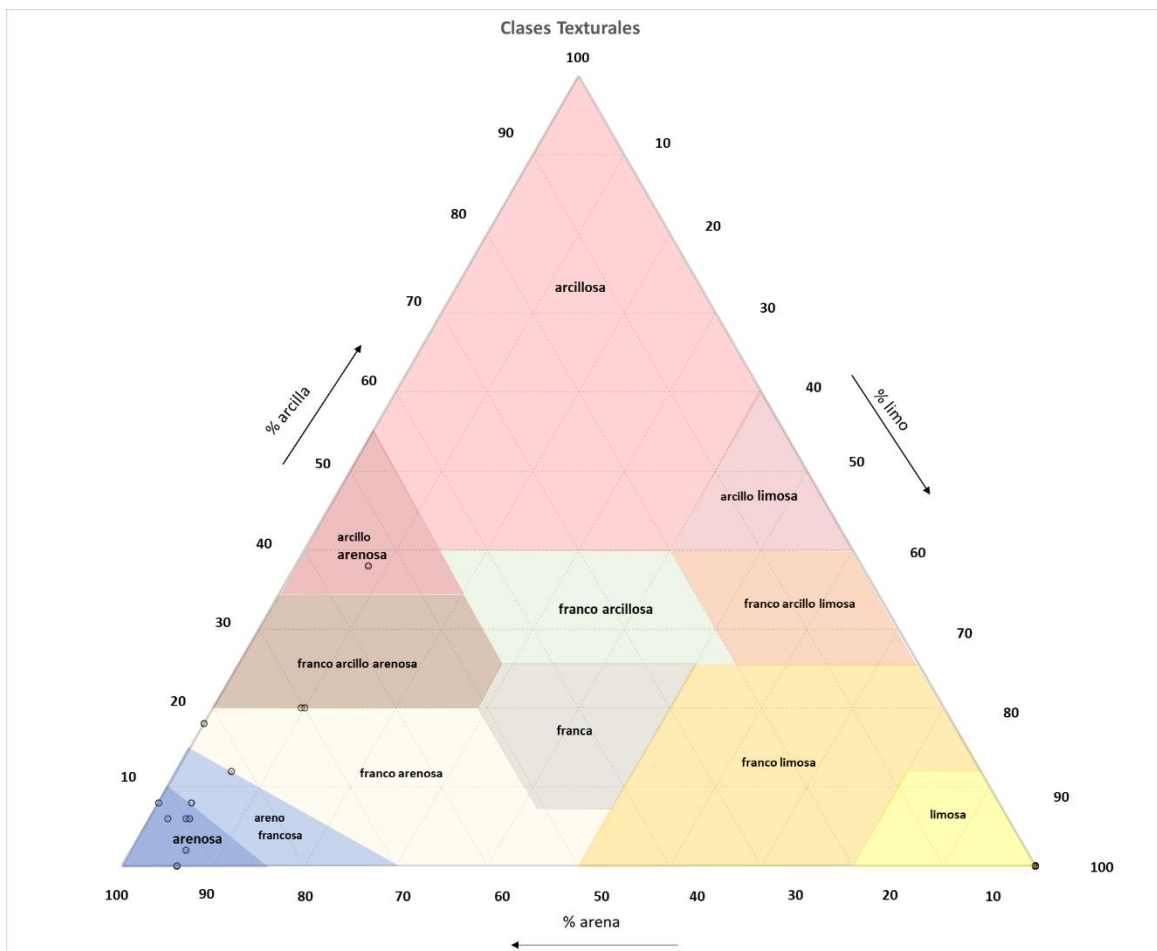
Uribia – Maicao (Guajira)



Cenicaña (Valle del Cauca)



Páramo de Guerrero (Tausa- Cundinamarca)



Aguachica, El Copey (Cesar), Riohacha (Guajira),
 San Onofre (Sucre), Murillo (Tolima), Filandia (Quindío), Chinchiná (Caldas), Tumaco
 (Nariño), Santa Rosalía (Vichada), Villanueva (Guajira), Vereda Peñas Blancas (Huila),
 Berlín- Tona (Santander).

Bibliografía

Alomar, D., y Fuchslocher, R. (1998). Fundamentos de la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes. *Agro Sur*, 26(1), 88–104. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1998.v26n1-11>

Aparicio Marengo, D., Ariza Daza, J., Calvo Trujillo, M., Daza Cuello, J., y Echávez Plata, E. (2012). Espectroscopia infrarroja: una técnica alternativa para la identificación de microorganismos. *Ciencia Y Salud Virtual*, 4(1), 123–131. <https://doi.org/10.22519/21455333.254>

Bastidas, E y Carbonell, J. (2010). Caracterización espectral y mineralógica de los suelos del valle del río Cauca por espectroscopía visible e infrarroja (400 - 2.500 nm). *Agronomía Colombiana* 28(2), 291-301, 2010.

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Camacho-Tamayo, J. (2013). Uso de la reflectancia difusa - NIR en la determinación de características físicas y químicas de un Oxisol. Carimagua – Meta. Universidad Nacional de Colombia- Bogotá. <http://bdigital.unal.edu.co/11558/1/07797091.2013.pdf>

Camacho-Tamayo, J. H., Forero, N., Ramírez, L., y Rubiano, Y. (2017). Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia Forestal*, vol.

20, núm. 1, 2017. Tomado de:

<https://www.redalyc.org/jatsRepo/4239/423949141001/html/index.html>

Carranza, A. (2019). Espectroscopia de reflectancia difusa – NIR para la determinación del contenido de agua en el suelo. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77517>

Castorena-García, J. H., Rojas-López, M., Delegado-Macuil, R., Robles de la Torre, R. R. (2011). Análisis de Pulpa y Aceite de Aguacate con Espectroscopia Infrarroja. *Conciencia Tecnológica*, (42),5-10. [fecha de Consulta 9 de octubre de 2022]. ISSN: 1405-5597. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94421442002>.

Ciancaglini- Prosap, N. (s.f.). R- 001- Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20_R001_Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf

Coblinski, J et al., (2020), Prediction of soil texture classes through different wavelength regions of reflectance spectroscopy at various soil depths. *Catena*. Volumen 189, 104485 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104485>

Correal, R., Quiñones, R., y Valderrama, A. (2019). Manual de procedimientos para el laboratorio de suelos de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio. [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Villavicencio, Colombia. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/12235/1/Manual_procedimientos_laboratorios.pdf

Corporación Autónoma Regional de la Guajira [CORPOGUAJIRA]. (s.f.). Plan de gestión

ambiental regional. Guajira. Recuperado de:

http://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments_Joom/article/57/PGAR.pdf

Cozzolino, D. (2002). Uso de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) en el análisis de alimentos para animales. *Agrociencia*, Vol.VI N° 2 pág. 25-32 Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA La Estanzuela, Colonia Uruguay.

Delgadillo y Martínez. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Universidad nacional autónoma de México. Departamento de edafología.

<https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Fernández, F. (2020). Desarrollo de modelo para determinar el stock de carbono orgánico del suelo con base en reflectancia difusa. Caso: Carimagua – Meta. [Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá]. Facultad de Ciencia Agrarias, Departamento de Agronomía. Bogotá.
repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79000/1020780896.2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gámez, C. (2019). Uso de modelos espectrales VIS- NIR para la determinación del contenido de carbono del suelo. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Bogotá, Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76626/1023886066.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gómez, R y Murillo, R. (s.f.). Espectroscopía Infrarroja. Recuperado de:
<https://sistemas.fcencias.unam.mx/~fam/Infrarroja.pdf>

González, F. (2016). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de suelos

paramunos del P.N.N. Sumapaz sometidos al cultivo convencional y orgánico de papa post descanso de actividad agrícola. [Trabajo de grado, Universidad distrital Francisco José de Caldas]. Bogotá, Colombia.
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7152/1/GonzalezBrice%C3%B1oFabianHernando2017.pdf>

González, M., y Montaña, L. (2015). La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI. Departamento de física. Centro de Investigación y de estudios avanzados. Instituto Politécnico Nacional. México.
Tomado de: http://www.lajpe.org/dec15/4602_Gonzalez.pdf

Gutiérrez, A. (2010). La espectroscopia NIR en la determinación de propiedades físicas y químicas de intermedios de producción y productos acabados. Universidad Autónoma de Barcelona.
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3316/apg1de1.pdf>

Heifer internacional. (2014). La cromatografía aplicada a la agroecología, develar el rostro de los suelos. Fundación Heifer Ecuador. Recuperado de: http://www.heifer-ecuador.org/wp-content/uploads/libros/CROMATOLOGRAFIA_%20CON_PORTADAS.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (s.f.). El Macizo Colombiano y su área de influencia. Caracterización de los suelos y tierras (cap. 4). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18780>.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (s.f.). La mitad del Atlántico tiene tierras arables aptas para el desarrollo agropecuario. Recuperado de:
<https://igac.gov.co/es/noticias/la-mitad-del-atlantico-tiene-tierras-arables-aptas-para-el-desarrollo-agropecuario>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2015). Suelos y tierras de Colombia.

- Macias Corral, M. A., Cueto Wong, J. A., Muñoz Villalobos, J. A., y Landeros Márquez, O. (2015). Predicción de propiedades del suelo de importancia agronómica por espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(6), 1317-1329. Recuperado en 27 de mayo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000600014&lng=es&tlng=es.
- Mantilla, G., De la torre L., Gómez, C., Ordoñez, N., Ceballos, J., Euscátegui, C., Pérez, P., Pérez, S., Martínez, N., Sánchez, R., Maldonado, N., Pérez, S., Gaitán, J., Chávez, L., Chamorro, C. y Flórez, A., (1998). Los suelos: estabilidad, productividad, degradación. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). *El medio ambiente en Colombia* (Cap. 6, pág., 233). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18777>
- Martelo, M. (2014). Desarrollo de métodos rápidos basados en espectroscopia UV-Vis, Nis para el análisis de vinos (pág. 65). Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/61967367.pdf>
- Marulanda, M. (2014). Carimagua, tierra de desarrollo. [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes] Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/1992/12222>
- Medina, T., Arroyo, G., y Peña, V. (2018). Cromatografía de Pfaiffer en el análisis de suelos de sistemas productivos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(3), 665-673. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1223>
- Medina, C. (2016). Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *Remediaciones. Revista Colombiana de Ciencia Animal* 2016; 8(1):88-93.
[https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/download/229/270#:~:text=El%20pisoteo%20de%20los%20animales,plantas%20leguminosas%20\(Fabaceae%20spp.\)](https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/download/229/270#:~:text=El%20pisoteo%20de%20los%20animales,plantas%20leguminosas%20(Fabaceae%20spp.))
- Moreno, J y Márquez, A. (2018). Análisis de la distribución del tamaño de partículas en

arcillas usando métodos tradicionales y modernos. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería]. Bogotá, Colombia.

<https://hdl.handle.net/10983/22884>

Norambuena V., P, Luzio L., W, y Vera E, W. (2002). Comparación entre los métodos de la pipeta y Bouyoucos y su relación con la retención de agua en ocho suelos de la zona altiplánica de la provincia de Parinacota, Chile. *Agricultura Técnica*, 62(1), 150-157. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000100015>

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). (2020). Propiedades físicas del suelo. Portal de suelos de la FAO. Tomado de: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). (2020). Los expertos y las instituciones están aunando esfuerzos para apoyar la toma de decisiones sobre la protección del suelo. Alianza por el suelo. Tomado de: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/es/c/1272408/#:~:text=La%20espectroscopia%20de%20suelos%20es,y%20la%20retenci%C3%B3n%20de%20agua>.

Restrepo y Piñero, 2011. *Cromatografía, Imágenes de vida y destrucción del suelo*. Cali, Colombia. ISBN 978-958-44-8582-3
<https://morralcampesino.files.wordpress.com/2016/03/cromatografia-restrepo-pinheiro.pdf>

Rodríguez. W, García. P, Fajardo. A. (2016). Aplicaciones de técnicas espectroscópicas para el análisis de suelos. Universidad Militar Nueva Granada. *Revista facultad de Ciencias Básicas*. ISSN 1900-4699. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.2030>

Perret, J., Villalobos Leandro, J. E., Abdalla Bolaños, K., Fuentes Fallas, C. L., Cuarezma

- Espinoza, K. M., Macas Amaya, E. N., López Maietta, M. T., & Drewry, D. (2020). Desarrollo de métodos de análisis de espectroscopia y algoritmos de aprendizaje automático para la evaluación de algunas propiedades del suelo en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(2). <https://doi.org/10.15517/rac.v44i2.43108>.
- Petto, A y Fandiño, J. (1988). Descripción de suelos: Municipio de Tumaco. Subdirección de Recursos Naturales. División asistencia técnica agropecuaria, sección suelos. Recuperado de:
<https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/0888.pdf>
- Sagredo, C. (2014). Las ventajas de la NIR. Soltex Chile. Recuperado de:
https://issuu.com/soltex_chile/docs/las_ventajas_de_la_espectrometr__a_
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2017). Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos. Centro de formación agroindustrial La Angostura. Laboratorio de ciencias Básicas. Huila.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (s.f.) Suelos en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Tomado de:
<http://www.siac.gov.co/sueloscolombia>.
- Shenk, J. S., y Westerhaus, M. O. (1996). Calibration the ISI way. In A. M. C. Davis & P. Williams (Eds.), *Near infrared spectroscopy: the future waves* (pp. 198–202). NIR Publications.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy*. Soil Conservation Service (Vol. 12). <http://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>
- Solonyezny, K. S., Moreno M. A., Rollán A. A del C., Bachmeler, O. A. (2015). Ventajas y desventajas de la medida de las fracciones granulométricas por medio del método del Hidrómetro en relación al método de la Pipeta. "VI Jornadas Integradas de Investigación y Extensión de la FCA" "Iº Jornada de Enseñanza en las Ciencias Agropecuarias" -3 y 4 de noviembre de 2015. Recuperado de:

http://www.agro.unc.edu.ar/~congreso/resumenes/_/investigacion/Solonyezny%20K.%20S._%20Ventaja%20y%20desventajas%20de%20la%20medida.....pdf

Souza, M., Franco, Henrique Coutinho, J., Amaral, L. (2020). Estimación de la disponibilidad de fósforo del suelo mediante espectroscopía visible e infrarroja cercana. *Scientia Agricola*, 77 (5), e20180295. Publicación electrónica 20 de diciembre de 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0295>

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Instituto de suelos. Argentina. Recuperado de:
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf

Valenciaga, D y Simoes, E. (2006). La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de ciencia agrícola*. Tomo 40. N° 3. Cuba.
<https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017723001.pdf>

Varón, V. (2016). Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva. [Tesis de maestría de la Universidad Nacional de Colombia]. Bogotá, Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58872/vivianamarcelavaronramirez.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Viscarra-Rossel, R.A., Catttle, S.R., Ortega, A. & Fouad, Y. (2009). In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by VIS – NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150, 253-266.

Viscarra-Rossel, R. A., McGlynn, R. N., & McBratney, A. B. (2006). Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137(1–2), 70–82.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004>

Zúñiga, F., Huertas, J., Guerrero, G., Sarasty, J., Dörner, J., y Burbano Orjuela, H. 2018. Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 183-196.
<https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363>