

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y
EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA COMUNIDAD
DE ACHIOTE DE LA COSTA ABAJO, PROVINCIA DE COLÓN**

PRESENTADO POR:
JENYFER P. CORDOBA MEZA
3-751-960

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2025

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y
EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA COMUNIDAD
DE ACHIOTE DE LA COSTA ABAJO, PROVINCIA DE COLÓN**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO EN MANEJO DE CUENCAS Y AMBIENTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O
PARCIAL DEBE SER OBTENIDA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS**

APROBADO:

MGTR. LEANNE A. URRIOLA S.

MGTR. ING. DIMAS I. ARCIA

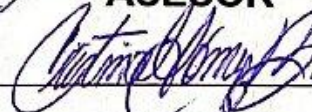
MGTR. CRISTINA GÓMEZ



DIRECTOR



ASESOR



ASESOR

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2025

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo y esfuerzo a Dios, mis padres y a cada persona involucrada
para hacerlo realidad...*

AGRADECIMIENTOS

Mis primeros agradecimientos siempre van dirigidos hacia Dios y familia por su incondicional apoyo para poder seguir con mis estudios; a mi madre Karina L. Meza, por sus consejos y ser mi principal motor de apoyo a lo largo de mi vida y a mi padre José L. Cordoba, por sus lecciones y consejos.

A mi hermano, José Alfonso Cordoba M. que siempre estuvo a mi lado en mis altas y bajas, gracias por apoyarme y hacer más fácil sobrellevar este proceso. A mis compañeros, J. Batista, A. Forsythe. Al señor F. Martínez y joven Dilam moradores de la comunidad de Achiote por siempre estar dispuestos a brindarme su ayuda durante este trabajo.

Le agradezco al magíster Leanne A. Urriola S. por aceptar ser mi asesora y estar siempre disponible a responder mis dudas y brindarme consejos en esta investigación, así como también a los magísteres Dimas I. Arcia y Cristina Gómez por brindarme sus consejos y apoyo a lo largo de mi formación académica, a la licenciada Maria E. Puerta por su paciencia y tiempo dedicado en ayudarme durante los análisis en laboratorio y hacerme sentir acogida dentro del departamento de suelos y aguas.

A todo el personal docente y administrativo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Panamá que de alguna u otra forma me brindó su apoyo en esta etapa tan importante.

A todos, desde el fondo de mi corazón, muchas gracias.

RESUMEN

Esta investigación tuvo por objetivo determinar las propiedades físicas, químicas en seis puntos estratégicos dentro de la comunidad de Achiote de la Costa Abajo de la provincia de Colón, al mismo tiempo, evaluar el cambio de uso del suelo y cobertura boscosa a nivel de corregimiento con la integración de un sistema de información geográfica. Los muestreos fueron realizados con un barreno holandés y un cilindro metálico para la determinación de la densidad aparente, se determinó la textura con el método Bouyoucos, densidad real con matraz aforado con alcohol para el posterior cálculo de porosidad y color mediante el Sistema de Notación de Munsell, el pH fue medido con un equipo potenciómetro (1:2,5 sólido: agua), la evaluación del contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black, el contenido de nutrientes (Mg, Ca, Fe, Mn, Zn, K, Cu y Na) por absorción atómica, la concentración de nitrógeno (N) mediante el método de Kjeldahl y fósforo (P) por colorimetría, la conductividad eléctrica fue leída por un conductímetro y el contenido de acidez a través de la titulación de acidez intercambiable del suelo. La evaluación del cambio de uso del suelo se realizó mediante la comparativa de capas geomáticas del uso del suelo y cobertura boscosa entre los años 2012 y 2021 con empleo de la herramienta “Compute Change Raster” del software de ArcGIS Pro. Las clases texturales variaron de franco arcillo arenosas a arcillosas mientras que las densidades aparentes presentaron valores de 0.71- 1.04 g/cm³ y las reales 1.76 – 2.28 g/cm³ lo que permitió obtener porosidades entre los 53.54 y 69.32 %, el color de las muestras secas varió de marrón pálido a marrón, mientras que en las húmedas fueron marrones grisáceos a marrón rojizo.

En cuanto a las propiedades químicas, los pH fueron de poco ácidos a ácidos (6.27 - 5.31), el contenido de nutrientes (Ca= 9.67 a 25.39 meq/100g, Mg= 7.30 a 8.90 meq/100, Fe= 338.41 a 63.27 ppm, Cu= 1.52 a 3.97 ppm, Mn= 18.65 a 84.01 ppm, Zn= 3.18 a 8.03 ppm, Na= 163.32 a 317.48 ppm, P= 0.97 a 19.06 ppm y K= 197.62 a 56.51 ppm). El contenido de materia orgánica mostró valores medio-bajos (1.03 – 5.03 %), el nitrógeno presentó concentraciones altas de (0.19 – 0.41 %). La conductividad eléctrica determinó suelo no salinos con valores de apenas 83 a 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$, también se presentó una baja concentración de acidez intercambiable de 0.2 – 1.2 meq/100g y poco contenido de aluminio (0.0 meq/100g). Para el año 2012, la región poseía alrededor de un 51.4 % de predominancia de pasto, mientras que para el 2021 el pasto presentó una tendencia de reducción de 44.5 %, siendo gran parte de este ocupado por bosque secundario. Entre la comparativa y evaluación entre los años 2012 y 2021 se diagnosticó que un 66.5 % no presentó cambio, mientras que un 33.5 % del área sí sufrió cambios a lo largo de los años, siendo un 16.4 % del pasto transformado a bosque secundario, lo que se traduce a una dinámica ambiental positiva para la región.

Palabras claves: Suelo, propiedades físicas, propiedades químicas, cambio de uso del suelo, cobertura boscosa, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

This research had the objective of determining the physical and chemical properties at six strategic points within the community of Achiote in the Costa Abajo in the province of Colón, while also evaluating changes in land use and forest cover at the district level with the integration of a geographic information system. Samples were taken using a dutch auger and a metal cylinder to determine bulk density. Texture was determined using the Bouyoucos method, actual density was determined using a volumetric flask with alcohol for subsequent calculation of porosity, and color was determined using the Munsell Color Notation System. pH was measured using a potentiometer (1:2.5 solid: water), organic matter content was evaluated using the Walkley and Black method, nutrient content (Mg, Ca, Fe, Mn, Zn, K, Cu, and Na) was determined by atomic absorption, nitrogen (N) concentration was measured using the Kjeldahl method, and phosphorus (P) was measured by colorimetry. Electrical conductivity was read by a conductivity meter, and acidity content was measured by titrating the soil's exchangeable acidity. Land use change was assessed by comparing geomatics layers of land use and forest cover between 2012 and 2021 using the *“Compute Change Raster”* tool in ArcGIS Pro software. The texture classes ranged from sandy loam to clay, while the apparent densities ranged from 0.71 to 1.04 g/cm³ and the actual densities from 1.76 to 2.28 g/cm³, resulting in porosities between 53.54 to 69.32%. The color of the dry samples ranged from pale brown to brown, while the wet samples were grayish brown to reddish brown.

In terms of chemical properties, the pH ranged from slightly acidic to acidic (6.27 - 5.31), the nutrient content (Ca= 9.67 to 25.39 meq/100g, Mg= 7.30 to 8.90 meq/100, Fe= 338.41 to 63.27 ppm, Cu= 1.52 to 3.97 ppm, Mn= 18.65 to 84.01 ppm, Zn= 3.18 to 8.03 ppm, Na= 163.32 to 317.48 ppm, P= 0.97 to 19.06 ppm, and K= 197.62 to 56.51 ppm). The organic matter content showed medium-low values (1.03–5.03%), while nitrogen presented high concentrations (0.19–0.41%). Electrical conductivity determined non-saline soils with values of only 83 to 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$. There was also a low concentration of exchangeable acidity of 0.2–1.2 meq/100g and low aluminum content (0.0 meq/100g). In 2012, grass predominated around 51.4% of the region, while by 2021, grass cover had decreased by 44.5%, with much of this area now occupied by secondary forest. A comparison and evaluation between 2012 and 2021 showed that 66.5% remained unchanged, while 33.5% of the area did undergo changes over the years, with 16.4% of the grassland being transformed into secondary forest, which translates into a positive environmental dynamic for the region.

Key words: Soil, physical properties, chemical properties, land use change, forest cover, geographic information systems.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xx
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2. ANTECEDENTES.....	4
1.2.1. Importancia del análisis de suelos.....	4
1.2.2. Propiedades físicas y su importancia.....	4
1.2.3. Propiedades químicas y su importancia.....	5
1.2.4. Relevancia de la evaluación del cambio de uso del suelo en la actualidad.....	5
1.2.5. Integración del análisis geoespacial para el análisis del cambio de uso del suelo.....	6
1.2.6. Influencia del cambio de uso del suelo en las propiedades del suelo.....	6
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	8
1.4. OBJETIVOS.....	10

1.4.1.	Objetivo general.....	10
1.4.2.	Objetivos específicos.....	10
1.5.	HIPÓTESIS.....	11
1.5.1.	Hipótesis nula.....	11
1.5.2.	Hipótesis alternativa.....	11
1.6.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	12
1.6.1.	Alcances.....	12
1.6.2.	Limitaciones.....	13
2.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
2.1.	Concepto de suelo.....	14
2.1.1.	Factores formadores y procesos de origen del suelo.....	14
2.1.2.	Composición del suelo.....	16
2.1.3.	El perfil y los horizontes del suelo.....	17
2.1.4.	Importancia del suelo para la agricultura.....	17
2.1.5.	Capacidad agrológica de los suelos.....	18
2.1.5.1.	Clases de capacidad de uso de suelo.....	18
2.1.5.2.	Parámetros y categorías para la evaluación de capacidad de uso del suelo.....	21
2.2.	Propiedades físicas de los suelos.....	21
2.2.1.	Textura.....	22
2.2.1.1.	Partículas representativas y triángulo textural.....	22

2.2.2. Densidad real y aparente.....	24
2.2.3. Porosidad.....	25
2.2.4. Color.....	26
2.2.4.1. Sistema de Munsell.....	27
2.2.6. Humedad del suelo.....	28
2.3. Propiedades químicas de los suelos.....	30
2.3.1. pH.....	30
2.3.1.1. El pH y los nutrientes del suelo.....	32
2.3.2. Capacidad de intercambio catiónico.....	33
2.3.3. Contenido de materia orgánica.....	34
2.3.3.1. Importancia de la materia orgánica en el suelo y agricultura.....	35
2.3.4. Conductividad eléctrica.....	36
2.3.4.1. Factores que afectan la conductividad eléctrica.....	36
2.4. Importancia del análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos.....	37
2.5. Uso del suelo.....	38
2.5.1. Tipos de uso de suelo.....	38
2.6. Uso actual y potencial del suelo.....	39
2.6.1. Conflictos de uso del suelo.....	39
2.7. Cambio de uso del suelo.....	39
2.8. El cambio del uso de suelo y su efecto sobre la cobertura boscosa.....	40

2.9. Impacto del cambio de uso del suelo en las propiedades del suelo.....	41
2.10. Sistemas de información geográfica (SIG).....	42
2.10.1 Principales elementos de los sistemas de información geográfica.....	42
2.11. Datos geográficos: Capas georreferenciadas.....	43
2.11.1. Tipos de capas.....	43
2.12. Aplicación de Sistemas de Información geográfica para la sociedad.....	44
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
3.1. Ubicación del área de estudio.....	45
3.2. Enfoque metodológico.....	45
3.3. Diseño de la investigación.....	46
3.4. Variables del estudio.....	46
3.5. Recolección de muestras y suelo y datos geoespaciales.....	46
3.6. Análisis de propiedades físicas en laboratorio.....	48
3.6.1. Densidad aparente.....	48
3.6.2. Densidad real.....	49
3.6.3. Porosidad.....	50
3.6.4. Textura.....	50
3.6.5. Color.....	52
3.7. Análisis de propiedades químicas en laboratorio.....	52
3.7.1. pH.....	52

3.7.2. Contenido de nitrógeno.....	53
3.7.3. Contenido de fósforo.....	55
3.7.4. Contenido de nutrientes.....	56
3.7.5. Conductividad eléctrica y salinidad del suelo.....	56
3.7.6. Contenido de materia orgánica.....	57
3.7.7. Concentración de acidez intercambiable.....	60
3.8. Procesamiento de datos geoespaciales y confección de mapas.....	61
3.9. Diagnóstico del cambio de uso del suelo entre los años 2012 y 2021.....	62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1. Caracterización de la zona de estudio.....	63
4.1.1. Clima.....	63
4.1.2. Geología.....	64
4.1.3. Suelos.....	64
4.1.4. Relieve.....	64
4.1.5. Hidrografía.....	66
4.2. Propiedades físicas del suelo.....	67
4.2.1. Textura.....	67
4.2.2. Densidad aparente, real y porosidad.....	68
4.2.3. Color.....	69
4.3. Propiedades químicas del suelo	70
4.3.1. pH.....	70

4.3.2.	Contenido de macro y micronutrientes.....	71
4.3.3.	Conductividad eléctrica, salinidad y contenido de sodio.....	72
4.3.4.	Contenido de materia orgánica y carbono orgánico.....	74
4.3.5.	Concentración de acidez y contenido de aluminio.....	75
4.4.	Uso del suelo y cobertura boscosa en los años 2012 y 2021.....	76
4.4.1	Condición en 2012.....	76
4.4.2.	Condición en 2021.....	77
4.5.	Cambio de uso del suelo entre los años 2012 y 2021.....	79
5.	CONCLUSIONES.....	82
6.	RECOMENDACIONES.....	85
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	86
8.	ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clases agrológicas de suelo. Fuente: MIRENEM 1995.....	19
Tabla 2: Descripción de partículas texturales. Fuente: QuimiNet, 2006.....	22
Tabla. 3: Comportamiento de nutrientes según el tipo de pH. Fuente: Casas, 2017.....	32
Tabla 4: Tipos de usos de suelo. Fuente: Villareal, 2000.....	38
Tabla 5: Clases texturales obtenidas.....	67
Tabla 6: Resultado de densidades aparentes, reales y porcentajes de porosidad de muestras.....	68
Tabla 7: Resultado de colores de muestras de suelos.....	69
Tabla 8: pH de muestras analizadas.....	70
Tabla 9: Contenido de macronutrientes.....	71
Tabla 10: Contenido de micronutrientes.....	71
Tabla 11: Caracterización de salinidad y contenido de sodio.....	73
Tabla 12: Presencia de materia orgánica y contenido de carbono orgánico.....	74
Tabla 13: Acidez intercambiable y contenido de aluminio.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Factores para la formación del suelo. Fuente: Jenny 1941.....	14
Figura 2: Proceso de formación del suelo. Fuente: Geology science 2024.....	16
Figura 3: Tamaño promedio de partículas de suelo. Fuente: Fiero (s.f.).....	23
Figura: 4: Triángulo textural. Fuente: FAO, (s.f.).....	23
Figura 5: Fórmula de densidad real del suelo. Fuente: Navarro y Navarro, 2013.....	24
Figura 6: Fórmula de densidad aparente del suelo. Fuente: Navarro y Navarro, 2013.....	24
Figura 7: Fórmula de porosidad del suelo. Fuente: Marinas, 2022.....	25
Figura 8: Determinación de color con el Sistema de Munsell. Fuente: Portal frutícola, 2019.....	27
Figura 9: Formas de agua presente en el suelo. Fuente: EcuRed, (s.f.).....	29
Figura 10: Escala de pH en suelo. Fuente: quimcasa, 2018.....	32
Figura 11: Capas vectorial y raster. Fuente: Esri, (s.f.).....	43
Figura 12: Vista geoespacial del área de estudio.....	45

Figura 13: Vista satelital de puntos de muestro dentro de la comunidad de Achiote. Fuente elaboración propia con tecnología de Google Earth Pro.....	47
Figuras 14, 15 y 16: Recolección de muestras de suelo en campo.....	47
Figuras 17, 18 y 19: Método de cilindro metálico para densidad aparente.....	48
Figuras 20 y 21: Pesaje de muestras húmedas y secas.....	49
Figura 22: Matraces volumétricos de 25 ml con alcohol etílico añadido.....	49
Figuras 23 y 24: Cilindros sedimentarios; Método de Bouyoucos.....	51
Figuras 25 y 26: Evaluación de color con Sistema de Notación de Munsell.....	52
Figura 27: Equipo potenciómetro.....	53
Figuras 28 y 29: Equipo Gerhardt y velp científica.....	54
Figura 30: Desarrollo de color chocolatoso después de la titulación con HCl.....	54
Figuras 31 y 32: Desarrollo de color y lectura de muestras en el colorímetro.....	55
Figuras 33 y 34: Empleo de equipo de absorción atómica.....	56
Figura 35 y 36: Filtrado de muestras 36: Lectura de muestras por conductímetro.....	57

Figuras 37 y 38: Preparación de muestras y adición de los 10 ml de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$ 1.0N).....	59
Figuras 39 y 40: Adición de los 20 ml H_2SO_4 y 200 ml a agua destilada.....	59
Figuras 41 y 42: Adición de los 10 ml de H_3PO_4	59
Figuras 43 y 44: Titulación de muestras con sulfato ferroso.....	60
Figura 45: Desarrollo de color verde en muestras de materia orgánica.....	60
Figura 46 : Interfaz de la aplicación ArcGIS Pro.....	61
Figura 47: Herramienta “ <i>Compute Change Raster</i> ” para la determinación del cambio de uso del suelo entre los años 2012 a 2021.....	62
Figura 48: Corregimiento de Achote. Elaboración propia.....	63
Figura 49: Mapa de pendientes presentes dentro del área de estudio.....	65
Figura 50: Mapa de hidrografía de Achote.....	66
Figura 51: Mapa de uso de suelo y cobertura boscosa en Achote en 2012.....	76
Figura 52: Mapa de uso de suelo y cobertura boscosa en Achote en 2021.....	77

Figura 53: Mapa de cambio de uso de suelo entre los años 2012 y 2021 en Achioté.....	79
--	----

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Composición del suelo.....	16
Gráfica 2: : Cobertura de bosques y uso de suelo en el año 2012.....	76
Gráfica 3: Cobertura de bosques y uso de suelo en el año 2021.....	78
Gráfica 4: Cambios de uso de suelo y cobertura boscosa entre los años 2012 a 2021.....	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1 y 2: Inicio de la comunidad de Achiote en la Costa Abajo, provincia de Colón, Centro de visitantes El Tucán, zona de muestreo número 4. Fuente: Panama – Birds & Wildlife (s.f.).....	104
Anexos 3 y 4: Sendero El Higuerón dentro del Centro el Tucán, presencia de actividad silvopastoril dentro de la comunidad de Achiote.....	104
Anexo 5: Encuesta acerca de la percepción de los moradores de Achiote. Fuente: Elaboración propia.....	105
Anexo 6: Encuesta de consideración sobre la conservación del bosque dentro de la comunidad de Achiote. Fuente: Elaboración propia.....	105
Anexo 7: Actividades del sector agropecuario desarrolladas en la comunidad de Achiote. Fuente: Elaboración propia.....	106
Anexo 8: Frecuencia de riesgos ambientales ocurridos en la comunidad de Achiote. Fuente: Elaboración propia.....	106
Anexo 9: Cultivos presentes en Achiote y superficie sembrada. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá (2023).....	107
Anexo 10: : Tenencia y aprovechamiento de la Tierra 2011 vs 2024. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá. Censo Agropecuario (2024).....	108
Anexo 11: Cantidad de productores por actividad principal en Achiote 2011 vs 2024. Fuente: INCEC. Censo Agropecuario (2024).....	109

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de los suelos son en gran medida las responsables del buen desarrollo de las plantas, sin embargo, pocas veces se les da la importancia que merecen, pues generalmente, son las propiedades químicas las que mayormente se consideran **(Ramírez, 1997)**. Por lo que resulta fundamental considerar y reconocer dentro de las investigaciones el rol fundamental que juegan las propiedades físicas en conjunto con las químicas en la dinámica del suelo. Entre las propiedades físicas más reconocidas se encuentra la textura, estructura, densidad real, densidad aparente, porosidad y color. Mientras que, por su lado, las propiedades químicas del suelo más representativas son el pH, cationes intercambiables (CIC), contenido de materia orgánica (MO), conductividad eléctrica y contenido de nutrientes. El conocer estas propiedades del suelo permite visualizar de forma efectiva a la vez analítica el tipo de manejo que requiere el suelo para ser usado de forma óptima sin que el mismo sufra problemas de degradación como compactación, acidificación, salinización, entre otros, que pueden llegar a afectar en gran medida la productividad del suelo. Y más aún, si este es utilizado para la producción de cultivos.

Por su parte también, los estudios sobre los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo se han convertido en el centro de investigación ambiental actual **(Bocco et al., 2001)**. Conocer el empleo del suelo, se ha convertido en la actualidad, en una información necesaria para la gestión adecuada del mismo, más aún, cuando dichas propiedades tanto físicas como químicas del suelo han sido alteradas para el desarrollo

de distintas actividades económicas y sociales, como es el caso de la comunidad de Achioté en la Costa Abajo de Colón.

Esta investigación de carácter descriptivo tiene por objetivo determinar las propiedades físicas y químicas del suelo, adicional a ello, evaluar cuánto ha cambiado el uso de suelo en Achioté con ayuda de un sistema de información geográfica (SIG) para demostrar de forma cuantitativa el aumento o disminución de la cobertura boscosa y expansión de la frontera agrícola dentro del área de estudio. Se tomaron en cuenta datos georreferenciados de la geodatabase del Ministerio de Ambiente, con información de la capacidad agrológica, composición de la cobertura boscosa entre los años 2012 a 2021. Adicional a ello, se evaluaron las distintas propiedades físicas y químicas del suelo, las actividades que se desarrollan sobre el terreno y las características topográficas. Con el fin de evaluar como dichos usos de suelo han evolucionado e impactan en las características físicas del suelo, comportamiento hídrico de los afluentes y vida silvestre dentro la comunidad de Achioté.

La presente investigación busca servir como base e incentivo para que se realicen nuevos, importantes e innovadores estudios en otras zonas adyacentes de la costa abajo caribeña de la provincia de Colón, con el principal fin de contribuir de forma positiva al desarrollo sostenible de diversas actividades educativas, científicas y agropecuarias.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel nacional, Panamá se caracteriza por poseer condiciones climáticas y topográficas que contribuyen al ámbito forestal. Hoy en día, la cobertura boscosa repartida en la Costa Abajo de la provincia de Colón está siendo observada con gran atención por los posibles usos inadecuados de los suelos, que trae consigo, una amenaza en la estabilidad de la cobertura boscosa de la región de Achiote. Los cambios de uso de suelo desarrollados en la comunidad de Achiote en la Costa Abajo de Colón han generado una gran alteración en las características físicas y químicas de los suelos. Los suelos de esta región se caracterizan por presentar altas pendientes y buena cobertura boscosa, por lo que, el establecimiento de infraestructuras en suelos donde su capacidad agrológica o uso potencial no es acorde a dicha actividad puede generar riesgos considerables como deslizamientos e inundaciones que perjudican la seguridad de la población, si no se toman en cuenta las debidas medidas necesarias de prevención.

Por tal razón, además de la determinación de la propiedades físicas y químicas del suelo, esta investigación se centra en conocer de forma detallada las distintas actividades que se desarrollan en la región con ayuda de capas georreferenciadas que forman parte de un sistema de información geográfica que, a su vez, permite conocer el comportamiento evolutivo o dinámica que el suelo y cobertura boscosa han desarrollado a lo largo de nueve años dentro del área de estudio.

Si se siguen desarrollando cambios abruptos en estos dos componentes que son considerados fundamentales en la cuenca, la calidad y lo más importante la seguridad de los habitantes de la comunidad de Achiote puede verse vulnerada ante riesgos ambientales.

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Importancia del análisis de suelos

El análisis de suelo es muy importante para el sector agrícola, ya que ayuda a conocer de mejor forma cuáles son sus propiedades físicas, químicas y los nutrientes que necesita o posee. Por medio de la información, se puede hacer un cálculo de la cantidad de fertilizantes o abonos a aplicar al cultivo, además de tener conocimiento de cuál sería el tipo de plantación apropiada para ese suelo obteniendo así un mejor aprovechamiento al cosechar el producto **(Velázquez et al., 2022)**.

Según **Gómez (2005)** el análisis de suelos permite realizar un monitoreo del estado y variaciones de la fertilidad en áreas donde se establecerán cultivos o en las que ya están establecidos, de tal forma que el técnico y agricultor tengan una herramienta de diagnóstico e interpretación para proyectar los planes de fertilización para optimizar los costos de producción de los cultivos bajo el concepto de agricultura específica y sostenible.

1.2.2. Propiedades físicas del suelo y su importancia

Es necesario reconocer que el suelo cuenta con características físicas fundamentales como lo son: color, textura, densidad aparente y real, estructura y porosidad. El color permite obtener información relevante sobre la génesis y composición mineralógica. La textura influye sobre la retención de agua, aireación y comportamiento ante el laboreo por parte del suelo. La estructura y porosidad actúan sobre la infiltración de agua y retención de nutrientes necesarios para el crecimiento de la vegetación. Mientras que la densidad aparente indica el grado de compactación del suelo y en conjunto con la

densidad real condicionan a la porosidad. El correcto manejo de estas propiedades garantiza una mejor estabilidad y productividad del suelo (**Salazar, 2018**).

1.2.3. Propiedades químicas del suelo y su importancia

Las propiedades químicas del suelo brindan información sobre el contenido de nutrientes a través de su fracción líquida en la cual entran en juego el pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica. El pH influye sobre la disponibilidad de nutrientes para ser asimilados por los cultivos. La conductividad eléctrica ayuda a saber si el contenido de sales presente en la solución del suelo afectará al desarrollo vegetal. Por su parte, la capacidad de intercambio catiónico refleja la facultad del suelo para almacenar o liberar iones positivos entre las fases sólidas y acuosas del suelo presentando una relación proporcional directa con el contenido de arcilla y materia orgánica (**Salazar, 2018**). Por último, el contenido de materia orgánica sirve como base de la actividad biológica del suelo, así como también, el contenido de nutrientes y condiciones de estructurales, hídricas y permeables del suelo (**Núñez, 1998**).

1.2.4 Relevancia de la evaluación del cambio de uso del suelo en la actualidad

Para **Vazquez et al. (2019)** el análisis de los cambios en el uso del suelo constituye una herramienta útil para tomar dimensión del proceso de agriculturización y los impactos ambientales. Los resultados de la investigación de **Vazquez et al. (2019)** mostraron que el cambio en el uso del suelo en la subcuenca del río Copalita, Tandil en Argentina, entre 1988 y 2015, tuvo una tasa de cambio que varió de -0.05 a 1.12% dándose un cambio positivo en los bosques de pino debido a los programas de reforestación y plantaciones

a pequeña escala en la parte alta y media de la subcuenca, mientras que la pérdida registrada se dio por el asentamiento para la agricultura y pastizal.

1.2.5. Integración del análisis geoespacial para el análisis del cambio de uso del suelo

El uso de imágenes satelitales y de sistemas de información geográfica (SIG) ayudan a interpretar de mejor manera los cambios causados por las diferentes actividades antropogénicas. **Sandoval y Cantú (2021)** realizaron un análisis geomático del cambio de uso del suelo en la subcuenca del río Copalita en Oaxaca, México y encontraron que desde 1995 hasta 2015 los cambios han sido dinámicos, en la parte alta de la cuenca se observó una recuperación de la cobertura boscosa del bosque de pino (BP) de un 0,35 %, debido a la reforestación integrada en los sistemas de producción agrícola 0,66 % y pastizales 1.12 %. Mientras que en la parte baja para 2015 se notó una reducción de la selva mediana, bosque pino encino y sabana debido al establecimiento de nuevas áreas para la agricultura y ganadería.

1.2.6. Influencia del cambio de uso del suelo en las propiedades del suelo

La degradación del suelo casi siempre se relaciona con la pérdida de la cobertura vegetal, sin embargo, no se conoce bien cuál es la secuencia de cambios y el impacto que tiene sobre las propiedades del suelo a largo plazo. **Muñoz et al. (2009)** analizó y comparó durante 4 años, la dinámica de 16 propiedades en 2 suelos de distintas condiciones, uno con cobertura vegetal (franco arenoso) y otro suelo desnudo (franco arcillo limoso). Entre sus resultados detalló que hubo diferencias en la densidad aparente, porosidad, infiltración por tipo de textura, pH, materia orgánica, carbonatos,

retención de humedad y nitrógeno. Enfatizó que la condición del sitio fue el factor de mayor impacto sobre las propiedades entre los suelos protegidos y los desnudos, considerando a la materia orgánica la propiedad de mayor peso ya que su presencia influye en la entrada de agua.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las propiedades de los suelos de Panamá son muy variadas debido a factores como región, clima, material de origen y topografía. El suelo a nivel nacional es muy utilizado para el desarrollo de actividades agrícola, por lo ello, el conocer las propiedades tanto físicas como químicas a través de un análisis de laboratorio, nos permite obtener información valiosa sobre el estado del suelo y así saber qué tipo de manejo y prácticas de conservación el mismo requiere para una mayor productividad en el desarrollo de cultivos.

Por otro lado, los cambios de uso de suelo han obtenido una gran importancia en la actualidad, no solo ambiental, sino también, económica. El suelo es uno de los recursos naturales que a nivel mundial mayor alteración y manipulación ha sufrido. Con la integración de grupos comunitarios y el establecimiento nuevas de vías de transporte para crear mayor conectividad entre las localidades, los cambios en la estructura del suelo se han convertido en la alternativa más viable para el país. El cambio en el uso del suelo se ha visto mayormente impulsado por inversionistas para la creación de puntos de comercialización, terrenos de producción de cultivos, tierras dedicadas a la ganadería que aportan a la economía del país con la generación de ingresos y empleos directos e indirectos. No obstante, es sabido que, cuando se da un uso sobreexplotado o inadecuado del suelo, aparecen problemas a corto, mediano y largo plazo que traen consigo cambios negativos en las propiedades físicas, químicas, rendimiento y características naturales que el suelo poseía antes de ser sometido a la alteración. Los cambios en los suelos han provocado una preocupación en los grupos comunitarios donde los recursos naturales poseen un valor intrínseco, más ahora, cuando el suelo

como recurso natural para las poblaciones, por el simple hecho de conservar sus propiedades naturales les ofrece servicios ecosistémicos esenciales a las comunidades, como es el caso de la comunidad de Achiote. Por ello, el concentrar la atención en el estado del suelo es de suma importancia no solo por sus beneficios de forma económica, sino también de manera social y ambiental.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se desea contribuir al desarrollo de la comunidad científico-ambiental y demostrar la importancia de los estudios de suelos, para así, sirva como base inicial para desarrollar nuevos estudios en áreas de la Costa Abajo de Colón que carecen de información edafológica, forestal, ambiental y científica. De forma tal, que se implementen practicas conservacionistas de suelos en esta y otras regiones que las requieran para potenciar la productividad y bienestar de los suelos y cobertura boscosa.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

- Determinar las propiedades físicas, químicas y evaluar el cambio de uso de suelo en la comunidad de Achiote en la Costa Abajo, provincia de Colón.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades físicas y químicas del suelo de seis puntos estratégicos dentro de la comunidad de Achiote.
- Describir las características topográficas e hidrográfica a través de la aplicación de análisis geoespacial ArcGIS Pro.
- Representar la cobertura boscosa entre los años 2012 y 2021, y evaluar su cambio entre ambos años.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis nula

- Los sistemas de información geográfica (SIG) no permiten evaluar el cambio de la cobertura boscosa entre diferentes años.

1.5.2 Hipótesis alternativa

- Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten evaluar el cambio de la cobertura boscosa entre diferentes años.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1. Alcances

La presente investigación se enfocó en analizar las propiedades físicas y químicas dentro de la comunidad de Achioté; paralelamente, también se centra en evaluar el cambio del uso del suelo a través de una comparativa entre los años 2012 y 2021 con el fin de conocer que tan dinámicos han sido los cambios en el área de estudio como estos pueden llegar a vincularse con la presencia de inundaciones y deslizamientos. Además, permitió identificar estrategias de manejo de suelos en base a su vocación natural que ayuden a su conservación. Presentamos ideas que contribuyan a un mejor manejo de la cobertura boscosa en la comunidad de Achioté. Considerando que, en los últimos años, la Costa Abajo de la provincia de Colón ha ido evolucionando de distintas formas, el análisis de fertilidad y cambio del uso del suelo representa un tema de fundamental interés, principalmente en la comunidad de Achioté en donde muchas familias pueden llegar a depender de lo que producen en sus campos agrícolas.

Pretendemos hacer un llamado de conciencia a las autoridades competentes a que tomen la iniciativa de realizar más estudios de esta índole en zonas aledañas, contribuyendo así, a un mejor ordenamiento territorial que permita asegurar el bienestar de los habitantes de la Costa Abajo.

1.6.2 Limitaciones

El acceso al lugar de estudio fue una de las principales limitantes, debido que el transporte hacia esa zona no es muy frecuente. Adicional a ello, la escasa información sobre el área de estudio obligó a generar datos desde cero para la investigación.

La recolección de las muestras de suelo también fue un gran desafío debido a que la investigación se vio muy limitada a las condiciones que se presentaban en el entorno, se daba la situación en donde se observaban áreas poco representativas para realizar muestreos y también zonas de difícil acceso por la topografía que se presentaba dentro del área de estudio.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Suelo

Concepto

Existen diferentes definiciones para el concepto del suelo:

Acosta (2006) define al suelo como el lugar de soporte donde el hombre construye sus viviendas, creando capitales. Mientras que, para las zonas rurales, es el recurso en donde crecen las plantas y cohabitan los animales.

Mientras que, **Velázquez et al. (2020)** lo definen como un recurso finito en el cual los procesos naturales para su formación, desarrollo y restauración no ocurren a la misma velocidad a que se degradan.

Por su parte, para **Osorio et al. (2022)** el suelo es un sistema heterogéneo que cumple diversas funciones como contar con capacidad purificadora, retener agua y nutrientes y acumular carbono. Por ello, el suelo es una base fundamental para la producción de alimentos requeridos para la creciente población mundial.

2.1.1. Factores formadores y procesos de origen

Jenny (1941) a través de una ecuación definió cinco factores fundamentales que intervienen en la formación del suelo:

$$s = f(cl, o, r, p, t, \dots)$$

Figura 1: Factores para la formación del suelo. Fuente: Jenny, 1941.

Paralelamente, **Bienes (2009)** define cada factor como:

- **s:** representa el suelo o las propiedades del mismo.
- **cl:** indica el clima, el cual es considerado uno de los principales factores (activo) que intervienen en la formación de los suelos, ya que de él dependen los flujos de agua que circulan por el perfil y temperatura.
- **o:** representa la actividad biológica de los organismos sobre la formación del suelo, y su influencia en los procesos de aportación de materia orgánica y descomposición para la formación del humus.
- **r:** representa el relieve que condiciona fuertemente la entrada y salida de flujo de energía.
- **p:** se refiere al material parental, desde el cual se forma el suelo, su composición mineralógica condiciona la estabilidad y evolución del proceso de transformación, su influencia es grande cuando el suelo es joven y va disminuyendo a medida que actúan los procesos formadores.
- **t:** indica el tiempo, el proceso de formación del suelo requiere de mucho tiempo y sus cambios no son perceptibles a la escala humana, su principal relación es de carácter cualitativo, debido a que, es muy difícil representarlo en cifras definidas.

Conjuntamente, el suelo para su formación atraviesa por una serie de fenómenos en los cuales intervienen los factores antes mencionados, principalmente el clima. El origen del suelo inicia a partir del proceso de meteorización sobre la roca madre, esta puede ser física que incluye la fragmentación mecánica, congelación, corrosión por agua o viento. Mientras que, la meteorización química crea materiales distintos al material parental como resultado de las reacciones químicas de oxidación,

hidratación e hidrólisis, y, por último, los procesos biológicos que contribuyen a la fragmentación de la roca madre a través de la acción de raíces que penetran y dilatan las grietas, que como resultado final origina una mezcla de minerales, agua y aire que representan la textura inicial del suelo **(Velázquez de Castro, 1998)**.

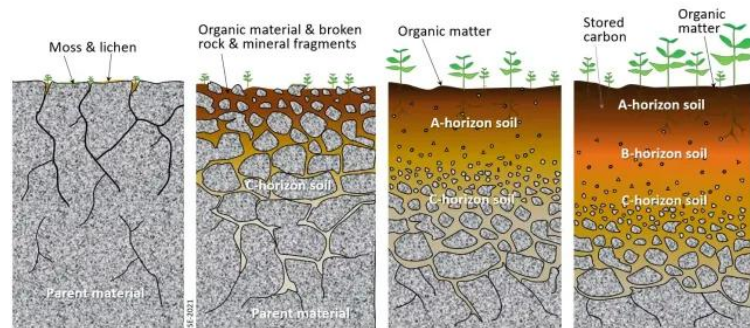


Figura 2: Proceso de formación del suelo. Fuente: Geology science, 2024.

2.1.2. Composición del suelo

El suelo contiene cuatro componentes en proporciones bien definidas material mineral (45 %), materia orgánica (5 %), aire (25 %) y agua (25 %) **(Acosta, 2006)**.

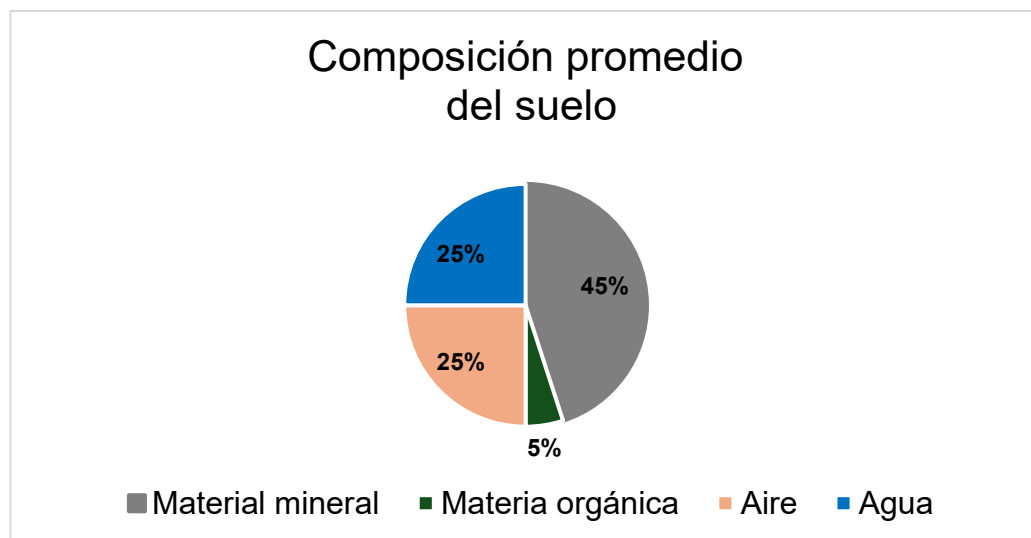


Gráfico No.1: Composición del suelo. Fuente: Elaboración propia.

2.1.3. El perfil y los horizontes del suelo

Para **Núñez (1998)** el perfil del suelo es un corte pronunciado realizado desde la superficie hasta llegar al material parental del suelo, mientras que, las diferentes capas secuenciales de distintos colores y texturas son denominados como horizontes y el conjunto de estos forman el perfil del suelo.

2.1.4. Importancia del suelo para la agricultura y ecosistema

Una de las más importantes características del suelo para la agricultura es su función como sostén de la producción agropecuaria, ya que en él se encuentran y extraen nutrientes, agua y aire que los cultivos requieren para desarrollo (**Coral et al., 2011**). Dentro del suelo se da la presencia de materia orgánica, la cual desempeña un papel fundamental para el mantenimiento de nutrientes, tanto así que se estima que de la materia orgánica un 3 – 5 % corresponde al nitrógeno total y otros elementos nutricionales para el desarrollo de los cultivos como lo son el calcio, fósforo, azufre, magnesio y micronutrientes (**Vistoso et al., 2022**).

Así mismo, **Prado et al. (2024)** reconocen que el suelo tiene una capacidad multifacética para sostener la vida en la tierra, a través de una serie de funciones que garantizan el equilibrio de los ecosistemas y el bienestar humano, entre estas funciones destacan:

- Brindar soporte físico para el desarrollo de las plantas, ser fuente de nutrientes, agua y aire. Ayudando al desarrollo de la mayoría de la flora terrestre, incorporando el 95 % de los alimentos que son consumidos.

- Servir como un filtro físico, químico y biológico natural, depurando el agua para su consumo y disponibilidad en los ecosistemas.
- Regula el clima mediante el almacenamiento d carbono, tanto así, que se considera que los suelo almacenan cerca de 2,500 gigatoneladas (10^{15} gramos) de carbono.
- Comprende de una enorme biodiversidad, estos incluyen la micro, meso y macrofauna de organismos que interactúan en él.

2.1.5. Capacidad agrológica de los suelos

La capacidad agrológica es definida como el sistema que permite decidir el uso más adecuado para una parte específica de un terreno (**Hudson, 1982**). Similarmente, **Conesa (2009)** la define como el ajuste que evidencian lo suelos para un determinado uso que brinda información relevante sobre la capacidad productiva que tendrán los cultivos dentro del área de interés.

2.1.5.1. Clases de capacidad de uso de suelos

El sistema de la capacidad agrológica de los suelos está dividida en ocho clases indicadas por números romanos, a media que aumenta dicho número, mayor será la presencia de limitaciones en el terreno para la aplicación de actividades agrícolas, pecuarias y forestales (**MAG, 1991**).

Tabla No. 1 - Clases agrológicas de suelo. Fuente: MIRENEM (1995).

Designación	Características
Clase I	• Pocas limitaciones, pendiente plana o casi plana, nula erosión sufrida, suelos muy profundos, textura media, poca pedregosidad, bajos problemas de toxicidad y salinidad, sin riesgo de inundación y zona de vida húmeda, periodo seco moderado, sin efectos negativos por el viento y neblina.
Clase II	• Leves limitaciones, se empieza a necesitar la aplicación de prácticas de conservación y manejo, pendiente ligeramente ondulada, leve erosión sufrida, suelos profundos, texturas moderadamente finas o gruesas, ligera pedregosidad, fertilidad media, salinidad y toxicidad leve, drenaje levemente excesivo o lento, ya hay riesgo de inundación y zona de vidas secas o muy húmedas, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento moderado.
Clase III	• Limitaciones moderadas, restricciones para ciertos cultivos, pendiente moderadamente ondulada, erosión sufrida leve, suelos moderadamente profundos, moderada pedregosidad, toxicidad y drenaje, salinidad leve, fertilidad media, riesgo de inundación, zona de vida seca o muy húmeda, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento moderado.

Clase IV	• Presencia de fuertes limitaciones, limitación en el uso de la vegetación semipermanente y permanente, pendiente ondulada, erosión sufrida moderada al igual que la textura, suelos moderadamente profundos, pedregosos, fertilidad media, toxicidad y drenaje moderado, salinidad leve, riesgo de inundación, zona de vida seca, muy húmeda o pluviales, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento moderado.
Clase V	• Severas limitaciones para el crecimiento de cultivos anuales, su uso se reduce al pastoreo y manejo forestal, con pendientes entre 15 – 30 % moderadamente ondulada, erosión sufrida y salinidad moderada, suelos poco profundos, textura gruesa o fina, alta pedregosidad, baja fertilidad, fuerte toxicidad, zona de vida seca o muy húmeda, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento fuerte.
Clase VI	• Vocación forestal, preferiblemente para cultivos permanentes como café o frutales, con específicas prácticas de manejo, pendiente fuertemente ondulado, severa erosión sufrida, suelos moderadamente profundos, textura muy fina o gruesa, fuerte pedregosidad, baja fertilidad, drenaje excesivo o lento, toxicidad fuerte, salinidad y riesgo de inundación moderado zonas de vida seca y pluviales a excepción de los páramos, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento moderado.

Clase VII	• Severas limitaciones, solo para manejo forestal, pendiente escarpada, erosión sufrida severa, suelo poco profundo, textura muy fina o gruesa, fuerte pedregosidad, muy baja fertilidad, drenaje excesivo o nulo, toxicidad y salinidad fuerte, riesgo muy severo de inundación, zona de vida seca y pluviales, periodo seco fuerte o ausente, neblina y viento fuerte.
Clase VIII	• Tierras que impiden completamente el desarrollo de actividades agrícolas o forestales, son únicamente zonas de protección de flora, fauna, acuíferos y reservas. Todas las categorías son limitantes.

2.1.5.2. Parámetros y categorías para la evaluación de capacidad de uso de suelo

Para la determinación de las anteriormente mencionadas clases de suelos, son utilizados los parámetros de pendiente, erosión sufrida, profundidad, textura, pedregosidad, fertilidad, toxicidad, salinidad, entre otras las cuales las condicionan (**MAG, 1991**).

2.2. Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos definen en gran parte la capacidad de muchos de los usos a los que el ser humano lo involucra. Los atributos físicos de un suelo indican la rigidez y fuerza de sostén, fluidez para la penetración de las raíces de las plantas, aireación, capacidad de drenaje, almacenamiento de agua, plasticidad y retención de nutrientes dentro de los sistemas productivos (**Rucks et al., 2004**). Las propiedades físicas han adquirido relevancia por su cercana relación con los sistemas de labranza,

debido que, en muchas en muchas ocasiones son las determinantes de la productividad del suelo, tanto así, que para diversos autores son consideradas como partes esenciales de la fertilidad del suelo (**Murillo, s.f.**).

2.2.1 Textura

La textura del suelo representa en proporción el contenido de limo, arcilla y arena, basándose en ella se puede determinar el tipo de cultivo que se pueden establecer sobre el terreno. Es de conocer que un suelo con textura arenosa no es apto para sembrar cultivos como arroz ya que este exige mucha agua, sin embargo, estos suelos pueden ser buenos para otros tipos de cultivos que requieran de un buen drenaje para su desarrollo, por esto, la textura es una de las propiedades físicas más representativas para el desarrollo de actividades agrícolas (**CATIE, 2002**).

2.2.1.1. Partículas representativas y triangulo textural

Las partículas de arena, limo y arcilla poseen tamaños promedios establecidos que permiten definir de forma específica la composición textural del suelo:

Tabla No. 2 - Descripción de partículas texturales. Fuente: QuimiNet (2006).

Partícula	Denominación	Tamaño (mm)
Arena	Arena muy gruesa	2.0 – 1.00
	Arena gruesa	1.0 – 0.50
	Arena media	0.50 – 0.10
	Arena fina	0.25 – 0.10
	Arena muy fina	0.10 – 0.05
Limo	Limo	0.05 – 0.002
Arcilla	Arcilla	Menor a 0.002



Figura 3: Tamaño promedio de partículas de suelo. Fuente: Fiero, (s.f.).

Dentro de los análisis texturales, una vez a definidos los porcentajes de cada una de las partículas en la composición del suelo, como método de diagnóstico se utiliza el reconocido triángulo textural, un gráfico que permite identificar texturas de suelo específicas en base en los porcentajes (%) de arena, limo y arcilla y cual se encuentra dividido en 12 áreas que contienen de forma representativa cada una de las proporciones de arena, limo y arcilla, la intercepción de las tres líneas de cada porcentaje define dentro del triángulo la clase textural del suelo (Thompson & Troeh, 1981).

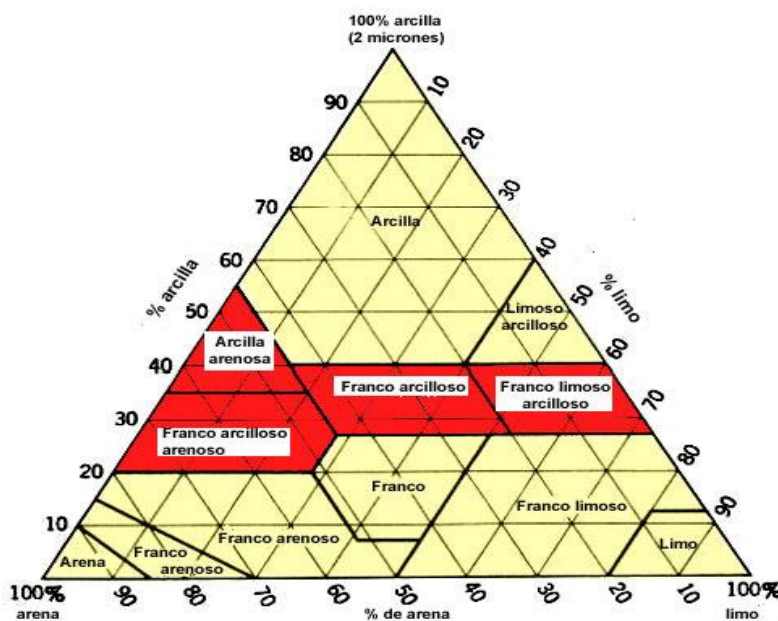


Figura 4: Triángulo textural. Fuente: FAO, (s.f.)

2.2.2. Densidad real y aparente

La densidad real (D_r) del suelo es la relación entre la masa de las partículas entre volumen de los sólidos expresada en g/cm^3 , para la mayoría de los suelos se utiliza la densidad real de la sílice (2.6 g/cm^3) o también la de los feldespatos (2.7 g/cm^3) porque estos se encuentran en mayor proporción dentro del arreglo mineral del suelo, a pesar de las notables variaciones en las densidades de los minerales, existe un valor aproximadamente establecido (**2.65 g/cm^3**) debido a que el cuarzo, arcillas y feldespatos conforman casi por completo la parte mineral del suelo, la densidad real se determina a través de la siguiente ecuación:

$$D_r = \frac{M_s}{V_s}$$

Figura 5: Fórmula de densidad real. Fuente: Navarro y Navarro, 2013.

En donde M_s : masa de suelo y V_s : volumen de suelo.

Es importante mencionar que el contenido de materia orgánica (MO) puede modificar el valor de 2.65, mientras que, en suelos de origen mineral, donde la MO no es tan presente, el valor no se ve afectado.

Por el contrario, la densidad aparente (D_a) relaciona la masa entre el volumen total del suelo, con la principal diferencia de que esta densidad toma en cuenta el volumen de los sólidos y de los poros. Es expresa de la siguiente manera:

$$D_a = \frac{M_s}{V_T}$$

Figura 6: Fórmula de densidad aparente. Fuente: Navarro y Navarro, 2013.

Donde Ms: masa de suelo y Vt: volumen total del suelo. La porosidad en los suelos es muy diferente entre suelos, por ello, la densidad aparente es un valor más variable que la densidad real (Dr), en situaciones ideales un suelo con 50 % de porosidad, la densidad aparente sería la mitad de la real o sea 1.32 g/cm³. La Da puede estar modificada según la textura, estructura, contenido de materia orgánica y compactación. Aquellos suelo más porosos la Da será menor, mientras que en más compactos será mayor (**Navarro & Navarro, 2013**). A comparación de otras metodologías más tediosas, para la determinación de la densidad aparente existe un método más sencillo llamado método muestreados tubular (MM) y también el método del cilindro metálico (MC) ambos procedimientos son efectivos para una efectiva determinación de la densidad aparente (**De Los Ángeles et al., 2014**).

2.2.3. Porosidad

El espacio de huecos presentes dentro del suelo que son ocupados por aire es la porosidad, esta propiedad permite la circulación de agua y aire, en dichos huecos se desarrollan actividades por microorganismos, lo que contribuye al crecimiento y penetración de las raíces (**Casas, 2012**). Al mismo tiempo, **Marinas (2022)** define la porosidad como el volumen de aire y agua en una unidad de volumen de suelo, expresada en porcentaje con un valor medio de 50 % - 80 % en suelos donde hay alto contenido de materia orgánica. La porosidad depende de las anteriores propiedades físicas mencionadas: densidad aparente y real, esto se evidencia mediante la siguiente fórmula para su determinación:

$$P = (1 - da/dr) \times 100$$

Figura 7: Fórmula de porosidad del suelo. Fuente: Marinas, 2022.

Donde P: porosidad total (%). da: densidad aparente y dr: densidad real.

De acuerdo con **Marinas (2022)** existen los macroporos (poros más grandes donde se mueve el aire) y los microporos (por donde viaja y se retiene el agua). El tamaño y porcentaje de esta propiedad es fundamental por su relación con la circulación, filtración y percolación a capas más bajas del suelo.

2.2.4. Color

El color del suelo es una de las propiedades más notoria y para algunos una de las más utilizadas para describir las características del mismo y reconocer los diferentes horizontes genéticos, tal es su importancia, que las primeras clasificaciones de suelos realizadas hace aproximadamente 100 años se apoyan en el color y vegetación. A pesar de que esta propiedad no tiene un efecto directo sobre el desarrollo de los cultivos, si puede llegar a verse involucrada de forma indirecta en la temperatura y humedad del suelo. El color suele ser muy utilizado para la clasificar características de importancia en investigaciones edafológicas (**Domínguez et al., 2011**).

Como indicador notorio de las características del suelo, el color se puede llegar a ver influenciado por el contenido de materia orgánica (humus y turba), hierro, manganeso y material parental, en base a la coloración se pueden llegar a asumir la presencia de ciertos compuestos (**Arias, 2001**):

- **Color rojizo:** oxidación de hierro, lo que puede indicar buena aireación y alta meteorización.
- **Color amarillo:** contenido de hierro hidratado (limonita) fuertemente meteorizado.

- **Color verdoso:** reducción de hierro, suelo saturado de agua por periodos prolongados.
- **Color gris:** abundancia de cuarzo, meteorización química y bajo contenido de materia orgánica.
- **Color oscuro:** contenido de materia orgánica que le brinda un color café por la turba, mientras que el humus otorga el color negro.

2.2.4.1. Sistema de Munsell

A diferencia de otras propiedades, el color del suelo es una de las más fáciles de acceder u observar, para ello, los especialistas utilizan frecuentemente el sistema de Munsell para describir el color de los suelos y así poder entender la propiedades físicas, químicas y biológicas mediante el cambio de este. Al día de hoy, estudios de mapeo del color del suelo se basan en la obtención indirecta de datos de color Munsell, sin embargo, dentro de los resultados pueden presentarse algunas desigualdades entre los colores mapeados y los colores observados por los humanos debido a la subjetividad de la evaluación (Lu et al., 2023).



Figura 8: Determinación de color con el Sistema de Munsell. Fuente: Portal frutícola, 2019.

2.2.6. Humedad del suelo

La humedad o cantidad de agua que contiene el suelo entre sus poros se origina por las precipitaciones, además de ello, también entra en juego el fenómeno de condensación (estado del vapor de agua a su estado líquido) cuando disminuye la temperatura por las noches parte de ese vapor se condensa sobre las superficies del suelo y cultivos mediante el rocío. Otra forma en la que el agua se presenta en el suelo es a través de sus capas más profundas, en ocasiones el suelo puede estar totalmente seco y a la misma vez puede existir una abundante capa de agua en sus profundidades llamada capa de *agua freática*, la cual puede subir a las capas más superficiales del suelo a través de canales formados por los poros, esta ascendencia capilar resulta fundamental para las raíces de los cultivos que se ven beneficiadas (**Cuadrado & Lorenzo, 1980**).

La humedad del suelo es un componente crucial para la fertilidad del suelo, influyendo en el crecimiento de los cultivos, su existencia da soporte a los procesos biológicos y ayuda a regular la temperatura del suelo. A día de hoy, es requerido conocer el agua disponible para potenciar su uso y controlar las propiedades del suelo (**Caicedo et al., 2021**). El contenido de agua dentro del suelo también es importante para el proceso de evapotranspiración, en el grado en que el suelo esté próximo a su capacidad de campo (agua contenida después de dos días después de realizado el riego) la ETP será mayor y el cultivo no tendrá que realizar mucho trabajo para absorber agua (**Valverde, 1985**).

De acuerdo con **Méndez y Monge-Nájera (2003)**, las fuerzas que se forman entre el suelo y las partículas que lo comprenden, el agua dentro de él se presenta en tres formas:

- **Agua hidrosférica:** Aquella que se encuentra alrededor de las partículas orgánicas y minerales y se encuentra firmemente retenida por ellas, lo que la hace inutilizable para las plantas.
- **Agua gravitacional:** La característica de esta es que drena de forma tan sencilla por el suelo que la hace difícil de absorber por las plantas.
- **Agua capilar:** Es la de mayor importancia para el crecimiento de las plantas ya que no se encuentra totalmente retenida en el suelo ni tampoco drena con facilidad, lo que le permite estar disponible para su absorción por las raíces.

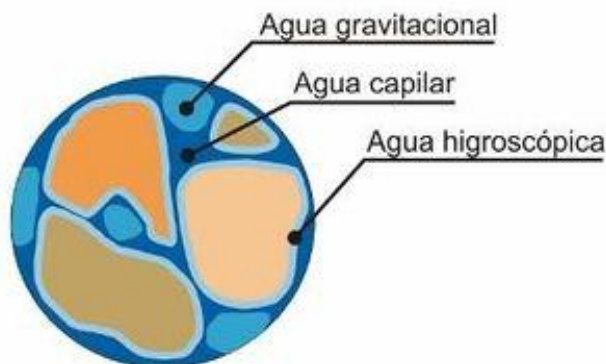


Figura 9: Formas de agua presente en el suelo. Fuente: EcuRed, (s.f.).

El estado del agua en ocasiones puede ser difícil de evaluar, esta propiedad influye sobre el color, estructura y consistencia del suelo. Un ejemplo claro es el color, cual cambia notablemente según el contenido de humedad, por tal razón es fundamental conocer el estado hídrico del suelo (**Hodgson, 1987**). Además de su influencia en otras propiedades, el funcionamiento de los ecosistemas terrestres depende en gran parte de los procesos de entrada y salida del agua que definen la cantidad y calidad del agua disponible para la vida de la Tierra. Dicha disponibilidad es considerada el principal factor limitante en la productividad de las actividades agrícolas. De todos los usos existentes del agua por el ser humano, la agricultura es la de mayor consumo con un uso promedio

de dos tercios del total a nivel mundial y en países con regiones áridas hasta un 80 % de consumo. Por ello, resulta fundamental conocer y cuantificar la dinámica de los procesos del agua dentro del sector agrícola para calcular los parámetros de disponibilidad para los cultivos y organizar los procesos de riesgo necesarios **(Villalobos & Fereres, 2017)**.

2.3. Propiedades químicas de los suelos

La parte química de los suelos se concentra en estudiar y comprender las propiedades que presentan los minerales de este tomando en cuenta los procesos de adsorción y absorción de cationes y aniones presentes en la materia orgánica, acidez o pH. La química de los suelos ha sido desarrollada y altamente estudiada para potenciar la productividad agrícola **(Méndez & Monge- Nájera, 2003)**.

Durante varias décadas, la química de los suelos ha sido utilizada para plantear soluciones directa e indirectamente a situaciones como la disponibilidad de nutrientes, toxicidad de iones, conversión de formas no asimilables de elementos complementarios en fertilizantes, dispersión de suelos, requerimientos de cal en suelos ácidos y yeso en suelos sódicos. Convirtiéndose su análisis en un instrumento importante para la clasificación de suelos, con el fin de que sea entendible de forma científica como de forma empírica para los propósitos de uso de suelo **(Garavito, 1974)**.

2.3.1. pH

El pH del suelo también llamado reacción del suelo es una propiedad química que permite determinar cuán ácido o alcalino es un suelo estando en contacto con el agua, funcionando como indicador de las reacciones químicas y biológicas que ocurren. Este factor mide la concentración del ion hidrógeno (H^+) en la solución del suelo en una escala

numérica del 0 al 14, a medida que aumenta este valor, menor es la concentración. Dentro de este rango un pH de 7 es considerado neutro, mayores a este alcalino y los valores menores se les atribuyen a suelos más ácidos (**Cremona & Enriquez, 2020**).

Del mismo modo **Villalobos y Fereres (2017)** lo definen como la disolución del suelo que se encuentre en balance con los protones (H^+) retenidos por los coloides del suelo ya sea arcillas, materia orgánica y óxidos. Estos niveles de acidez o alcalinidad pueden afectar las propiedades fisicoquímicas y biológicas. Algunas de las situaciones que presenta el pH en el suelo son:

- Los problemas en suelo muy ácidos pueden ser remediados con la adición de enmiendas de cal (encalado).
- En suelos muy calcáreos suele ser muy difícil de modificar debido al alto poder de tampón, sus limitaciones pueden ser la restricción en la absorción de otros nutrientes, sin embargo, estas restricciones pueden ser sobrellevadas con fertilizantes y prácticas adecuadas de fertilización.

Ciertas características que constituyen la fertilidad del suelo pueden verse alteradas por el pH:

- La solubilidad de elementos minerales: Suelos de pH bajos poseen riesgos en la eficiencia de nutrientes como Ca, Mg y K, O y Mo por su bajo contenido, mientras que el contenido de aluminio aumenta y se dan situaciones de toxicidad.
- Los valores máximos del pH reducen la actividad de los microorganismos del suelo afectando los procesos de descomposición de la materia orgánica, nitrificación y fijación simbiótica de dinitrógeno (N_2) en condiciones ácidas.

- En suelos ácidos, la baja concentración de Ca se puede relacionar con un incremento en la dispersión de coloides si no existe una alta concentración de Al, por ellos estos suelos presentar una mala estabilidad estructural o baja permeabilidad (Villalobos & Fereres, 2017). Esta propiedad posee una influencia indirecta en el desarrollo de los cultivos, principalmente porque regula la disponibilidad de nutrientes y afecta la actividad de los microorganismos en el suelo (Guarnaschelli, 2009).

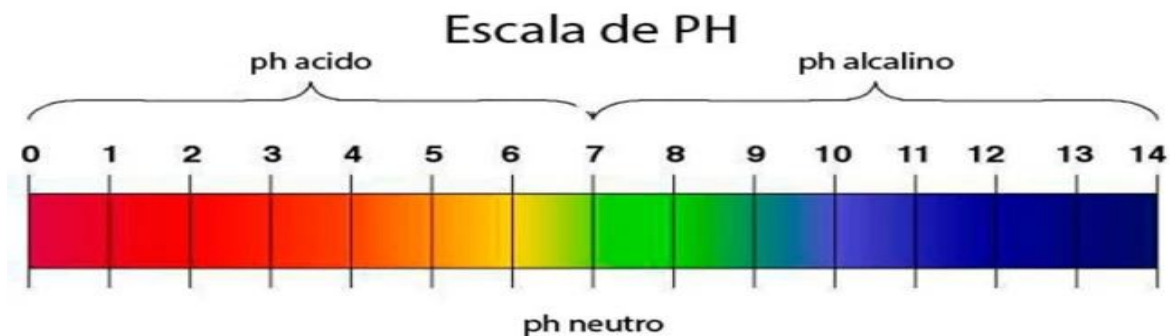


Figura 10: Escala de pH en suelo. Fuente: quimcasa, 2018.

2.3.1.1. El pH y los nutrientes del suelo

Casas (2017) mediante una tabla expresa los comportamientos de los nutrientes del suelo requeridos en relación con el tipo de pH:

Tabla No. 3 - Comportamiento de nutrientes según el tipo de pH. Fuente: Casas (2012).

Nutriente	Comportamiento en el suelo
Nitrógeno	Su disponibilidad no muestra problema en pH de entre 5,5 – 8.
Fósforo	• En pH menor 6,5 se precipita con el hierro y aluminio. • pH mayores a 7,5 se precipita con el calcio. • Con pH mayor a 8,5 se solubiliza con el sodio.

Potasio	Su solubilidad es alta en suelos con pH normales, en pH mayores a 8 se da un antagonismo con el calcio.
Calcio	En pH ácidos es muy escaso.
Hierro, magnesio, cobre, zinc y aluminio	A menor pH, mayor es la solubilidad de estos nutrientes.
Boro	Es más escaso en pH altos.
Molibdeno	En pH ácidos se produce deficiencias de este elemento.

2.3.2. Capacidad de intercambio catiónico

Las fracciones de arcillas y humus del suelo forman estructuras laminares conocidas como micelas, las cuales poseen superficies con cargas negativas encargadas de atraer iones positivos que en muchos de los casos son más pequeños y móviles, esta proporción de partes utilizables en las micelas para entrelazar iones positivos (cationes) se denomina capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC), la cual es expresada en miliequivalentes de cationes por 100 g de suelo o también en cmol por kilogramo de suelo. Mientras más alta sea la CIC, mayor capacidad tendrá el suelo de retener e intercambiar cationes, asegurando así una nutrición adecuada para los cultivos. Esta propiedad química es muy variante según el tipo de suelo y estructura, el complejo de arcilla/humus, tipo de micela y contenido de materia orgánica en el suelo (**Gliessman, 2002**).

Del mismo modo, la **FAO (s.f.)** define a la CIC como una medida de la cantidad de cargas negativas en las superficies minerales y orgánicas del suelo e indica la cantidad de cationes que pueden llegar a ser retendidos en dichas superficies. Un suelo con una CIC

alta puede retener muchos cationes de los nutrientes, esto quiere decir que los nutrientes que sean agregados al suelo y rebasen esa cantidad de cationes, pueden ser sencillamente lavados por precipitaciones o agua de riegos, esto también sustenta que suelo con una CIC baja requieren de un manejo distinto en la aplicación de fertilizantes.

2.3.3. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica (MO) del suelo está formada por restos vegetales, animales y biomasa, su composición es muy heterogénea según su proceso de origen e intensidad de los procesos que influyen en su descomposición, la materia orgánica es incorporada en el suelo por la actividad microbiana en sus componentes básicos, hidratos de carbono, proteínas, ácidos orgánicos, lignina y grasas. Todos estos compuestos pueden seguir degradándose hasta convertirse en compuestos minerales asimilables para los cultivos **(Fuentes, 2007).**

Según, **Román et al. (2013)** no existe una definición única para la materia orgánica, sin embargo, la reconoce como cualquier material de origen animal o vegetal que retorna el suelo después de pasar por un proceso de descomposición en el que actúan los microorganismos. Puede estar formada por hojas, raíces, estiércol, orín, plumas, huesos entre otros residuos.

La materia orgánica del suelo está compuesta por carbono C (52 - 58 %), oxígeno O (34 – 39 %), hidrógeno H (3,3 – 4,4 %) y nitrógeno (3.7 – 4,1 %). Para su determinación en laboratorio es muy utilizado el método de Walkley – Black, en cual, a través de una combustión húmeda, define el contenido total de carbono orgánico de una muestra pasada por un tamiz de 2 mm, para la expresión en porcentaje del contenido de MO se

multiplica por 1,724, tomando en cuenta que un 58 % de la MO corresponde al carbono (Sadeghian, 2010).

2.3.3.2. Importancia de la materia orgánica en el suelo y agricultura

De las propiedades químicas, la materia orgánica es una de las que mayor reconocimiento recibe por su gran influencia en las propiedades del suelo (Casas, 2012).

En las propiedades físicas:

- Mejora la estructura, por medio de una mejor estabilidad brindada a los agregados del suelo, ayuda a la retención de agua disponible para los cultivos y aumenta la capacidad calorífica.

En las propiedades químicas:

- Normaliza la presencia de nutrientes en sus formas orgánicas (adsorción de agua, reservas de nitrógeno, inmoviliza algunos metales pesados), incrementa la disponibilidad de nutrientes (la alta CIC del humus 200 meq/100g le permite al suelo ceder nutrientes asimilables al cultivo, crear complejos con el hierro, manganeso, zinc y cobre) y apoya a la regulación del pH.

Propiedades biológicas:

- Estimulación en el desarrollo de las raíces, mantiene la edaoflora y fauna y algunos de sus elementos poseen antibióticos contra organismos patógenos.

2.3.4. Conductividad eléctrica

La capacidad en la que un material o recurso para transmitir corriente eléctrica se denomina conductividad eléctrica (CE), esta propiedad química, generalmente, suele ser expresada en milisiemens por metro (mS/m) o decisiemens por metro (dS/m), cualquiera de estas dos unidades son las medidas estándares de la CE. Dicha propiedad es la mayormente utilizada para medir de forma indirecta la cantidad de sales presentes en el suelo (salinidad del suelo) que es considerada un problema de degradación del suelo ya que afecta la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y los microorganismos que influyen en procesos fundamentales. Esta alta concentración de sales afecta el desarrollo de las plantas por la condición de estrés hídrico que puede ocasionar al mermar la disponibilidad de agua en el suelo, la salinidad es una situación común de ver en suelos de climas áridos y semiáridos, y estos requieren de prácticas de manejo especiales según sea el caso. La concentración de sales puede aumentar por influencia del cultivo, riego y manejo del suelo, también afecta a otras propiedades del suelo como lo son la textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), drenaje, contenido de materia orgánica, salinidad y características del subsuelo (Arya & Khan, 2020).

2.3.4.1. Factores que afectan la conductividad eléctrica

Diversos son los factores que afectan a la conductividad eléctrica entre estos se encuentran los minerales del suelo, el clima y textura del suelo. El origen de las sales se da por la meteorización de rocas y minerales, en regiones con alta cantidad de precipitaciones, las sales solubles de los minerales y rocas se desplazan por el subsuelo hasta llegar a las aguas subterráneas o cuerpos de agua que trasladan sales al océano. Por otro lado, en zonas con menos precipitaciones o donde se utilizan agua de riego

salina, la concentración de sales solubles tiende a aglomerarse en la superficie del suelo, lo que genera una alta conductividad eléctrica. El cultivo, riego, uso del suelo y aplicación de fertilizantes también pueden llegar a afectar la CE, el regar con agua con altos contenido de sales hace que las mismas se acumulen en la zona de raíces, lo que la incrementa, la aplicación de fertilizantes nitrogenados y manejo de suelo que conduce a una disminución en el contenido de materia orgánica, deficiente drenaje, poca infiltración y compactación son situaciones que también pueden aumentar la presencia de sales y conducir a problemas de degradación de suelos **(Arya & Khan, 2020)**.

2.4. Importancia del análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos

Para definir las prácticas correctas de manejo de suelos, resulta fundamental conocer bien las propiedades físicas y químicas del suelo y cultivo que se desea implementar, esta información se obtiene a través de un análisis de laboratorio que permite identificar las deficiencias nutricionales o afectaciones físicas, con estos datos ya se hace más fácil determinar el tipo de operaciones, maquinarias e implemento a utilizar en cada tipo de suelo **(Corpoica, 1996)**.

Tomando en cuenta lo anterior, se reconoce que para los sectores agrarios el análisis de las propiedades físicas y química permite conocer el estado de suelo y los nutrientes que este posee y a su vez necesita. Al conocer esto, se pueden realizar cálculos más precisos de la cantidad de fertilizantes para el cultivo, además de identificar el tipo de plantación que mayor compatibilidad con el suelo **(Velázquez et al., 2022)**.

2.5. Uso del suelo

El término de uso de suelo hace alusión a la forma en que el ser humano gestiona los diferentes tipos de coberturas existentes para llevar a cabo actividades agrícolas, ganaderas, forestales y urbanas o recreativas (**Calvano & Rico, 2014**).

Igualmente, **Da Silva et al. (2013)** relaciona el uso del suelo como relación mutua entre la interacción que se da entre los individuos y el espacio geográfico en el cual este habita, dicha relación es manifestada por la utilización del recurso para satisfacer las necesidades de la población.

2.5.1. Tipos de uso de suelo

Los usos del suelo son divididos en distintas categorías referente al tipo de actividad realizada:

Tabla No.4 - Tipos de usos de suelo. Fuente: Villareal (2000).

Tipo de Uso	Descripción
Agrícola y pecuario	Suelos con destinos de uso intensivo que involucran cultivos, pastos mejorados y actividad ganadera.
Agroforestal	Suelos enfocados en la integración de árboles con otros sistemas de producción como las actividades silvoagrícola y silvopastoril.
Forestal	Suelos dedicados únicamente a la seguridad del ecosistema como los bosques protectores de flora y fauna.

Uso urbano	Zonas de expansión de proyectos urbanísticos.
Cuerpos de agua	Se refiere a suelos ocupados por ríos, lagos u lagunas.

2.6. Uso actual y potencial del suelo

El uso actual del suelo hace referencia a todo tipo de actividad agropecuaria o de otra índole que se realiza en el presente y que resultado de las interacciones previas entre el ser humano y el medio **(Calvano & Rico, 2014)**. Al contrario del uso actual, el uso potencial es definido como la verdadera vocación de uso del suelo que se puede llevar a cabo sin generar impactos negativos de gran magnitud y permita establecer actividades aprovechables **(Villarreal, 2000)**.

2.6.1. Conflictos de uso del suelo

A nivel mundial es muy común que el uso actual suelo no encaje con el uso potencial **(Miragem, 1982)**. Esta situación crea los reconocidos conflictos de uso de suelo existentes, dados principalmente porque los patrones de uso actual del suelo van más enfocados en los factores sociales, económicos y cultural, mientras que el uso potencial se concentra en el conocer las características físicas y químicas del suelo, condición ambiental y cualidades fisiográficas que determinan su uso primordial **(IICA, 1995)**.

2.7. Cambio de uso del suelo

El cambio de uso del suelo es definido por **Montero y Viales (2015)** como la modificación de la apariencia física, manejo y atributos de una región específica.

Del mismo modo, **Moreno y Renner (2006)** relacionan el cambio de uso del suelo como el resultado de procesos de intensificación y alteración del uso del suelo por efecto de modificaciones de la cobertura vegetal producidas por la intensidad de actividades antrópicas como las agrícolas y forestales.

2.8. El cambio del uso del suelo y su efecto sobre la cobertura boscosa

El cambio de uso del suelo se encuentra estrechamente relacionado con una de las actividades más degradantes del mundo, la deforestación o reducción de la cobertura boscosa que se da por la ampliación de áreas agrícolas, pastoreo y zonas urbanas. Es tal su impacto que se ha llegado a estimar que una tercera parte de la superficie terrestres ha sido utilizada para el desarrollo de estas actividades conforme aumenta la población **(Erazo & Cárdenas, 2013)**. El uso y cambio de uso del suelo son una de las principales fuentes emisoras de carbono contribuyendo así al calentamiento global **(Kanninen et al., 2008)**.

La reducción de la cobertura vegetal origina consecuencias **(Moreno & Renner, 2006)** como la modificación de las condiciones de vida de la flora y fauna silvestre, alteración en la velocidad del viento e interrupción en los ciclos bioquímicos del carbono y nitrógeno. Otros de los problemas más destacables por la pérdida de cobertura boscosa y su fragmentación están: la invasión de tierras, asentamientos de actividades agropecuarias no sostenibles, extracción excesiva de leña, construcción de infraestructuras e incendios forestales **(Ortega et al., 2010)**. En la actualidad el análisis de escenarios de cambio de uso de suelo y deforestación son de gran importancia debido a que los bosques como recursos son los principales agentes en proporcionar servicios ecosistémicos, como hábitat de muchas especies de flora y fauna silvestre, productor de materia prima

(madera), captación de dióxido de carbono y protección de cuencas hidrográficas (**Erazo & Cárdenas, 2013**). Una de las principales estrategias para la conservación del ambiente natural, el cual incluye el agua, aire, suelo y bosque es la reforestación (plantación de árboles en bosques previamente alterados), esta práctica contribuye a la protección de estos recursos y las cuencas hidrográficas y áreas protegidas de las cuales forman parte (**Molina, 2019**).

2.9. Impacto del cambio de uso del suelo en las propiedades del suelo

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden verse negativamente afectadas por el uso que se le da al mismo (**Jiménez et al., 2007**). Los cambios de uso del suelo son los principales responsables de los procesos de degradación del suelo como la desertificación a través de la erosión hídrica, salinización y reducción de la cobertura boscosa por el abandono de tierras manejadas, la sobreexplotación de los depósitos hídricos, alteración de la estructura edáfica e inadecuada planificación de uso del suelo (**Castillo, 1998**). Teniendo en cuenta lo anterior, **IICA-Brasil (1995)** reconoce que cuando se realizan estos procesos de labranza de forma incorrecta se originan problemas de compactación, desestabilización de estructuras, erosión eólica e hídrica, aun considerando que la erosión es variable, se calcula que se puede dar una pérdida aproximada de suelo de 50 TM de suelo/ha/año y la reducción del contenido de materia orgánica. Otras de las propiedades físicas que se pueden ver alteradas por los cambios de uso del suelo son la porosidad, densidad aparente, permeabilidad influyen directamente en la variación del proceso de infiltración (**Sandoval et al., 2021**). Por otro lado, la alteración de algunas de las propiedades químicas como el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y el contenido de macro

y micronutrientes pueden llegar a ser indicativas de efectos por el cambio de uso del suelo (Yáñez et al., 2018).

2.10. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información geográfica (SIG) es la unificación organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para capturar, manejar y analizar en todos sus aspectos la información geográficamente georreferenciada con el objetivo de solucionar problemas de planificación y gestión en los ámbitos social y ambiental (Andrades et al., 2020).

2.10.1 Principales elementos de los Sistemas de Información geográfica

Una visión diferente para describir y entender los sistemas de información geográfica es a través de los cinco elementos principales que los componen (Andrades et al., 2020):

- 1. Datos:** Son la materia base de los SIG, representan los atributos, descripción y geometría de los componentes espaciales.
- 2. Métodos:** Integra las técnicas que ayudan a realizar los análisis.
- 3. Software:** Representa el sistema lógico que gestiona, manipula y administra los datos.
- 4. Hardware:** Es el equipo que soporta el software.
- 5. Humanos:** Simboliza a las personas que utilizan y administran el software, como los usuarios y especialistas.

2.11. Datos geográficos: Capas georreferenciadas

Dentro de los Sistemas de Información Geográfica, una de las estructuras de datos más utilizadas son las capas, la cuales son una representación visual de un espacio geográfico específico y son muy empleadas para la representación de caminos, ríos, relieve y fronteras (**Esri, s.f.**).

2.11.1. Tipos de capas

Las capas representativas dentro de los análisis geomáticos son clasificadas en dos modelos según **Vila & Varga (2008)** los vectoriales y raster.

- **Capa vectorial:** Utilizado para localizar con exactitud los elementos representantes, por lo general, integra la visualización de puntos (ubicación), líneas (modelización de caminos, ríos o curvas de nivel) y polígonos (líneas cerradas para la representación de áreas).
- **Capa raster:** La representación de información en este modelo se da a través de un sistema de celdas o píxeles en forma de red rectangular.

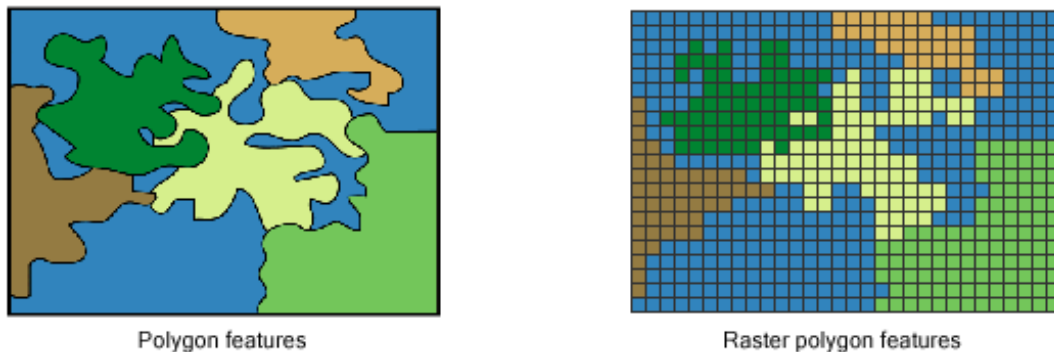


Figura 11: Capas vectorial y raster. Fuente: Esri, (s.f.).

2.12. Aplicación de sistemas de información geográfica para la sociedad

Los sistemas de información geográfica se han vuelto fundamentales para la toma de decisiones en todos los ámbitos de la sociedad, por ello se hace necesario resaltar su aporte en la generación de información de los siguientes factores según **Núñez (2012)**:

- **Aplicaciones ambientales y de producción agroganadera:** Los SIG contribuyen al análisis de uso y coberturas del suelo, pronóstico de cosechas, planificación de uso de fertilizantes y plaguicidas, manejo de áreas ganadera, manejo de cuencas hidrográficas, estudios de impacto ambiental, análisis de riesgos y estudios forestales.
- **Gestión territorial:** Planificación urbana, diseño de vías de tránsito, monitoreo de tránsito aéreo y gestión de servicios públicos.
- **Desarrollo social:** Análisis demográficos, gestión de servicios sanitarios y educativos.
- **Comercial:** Estudios de mercado y organización de densidad de comercios y sus medios de transporte.
- **Aplicación de carácter marcial:** Observación de territorios de seguridad y protección, planeación de estrategias tácticas y modelación de circunstancias de enfrentamiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el corregimiento de Achiote localizado en la provincia de Colón, específicamente en la Costa Abajo dentro del distrito de Chagres, con coordenadas geográficas de 9°13'22" latitud norte y 80°1'9" longitud oeste en formato de grados, minutos y segundos abarcando este corregimiento una superficie aproximada de 6,203.85 ha.



Figura 12: Vista geoespacial del área de estudio

3.2. Enfoque de metodológico

El estudio se encuentra guiado por un enfoque mixto de tipo descriptivo, en el cual se integran datos cuantitativos mediante el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo con procedimientos cualitativos apoyados por el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la evaluación geoespacial del cambio de uso del suelo.

3.3. Diseño de la investigación

El diseño del estudio es de tipo descriptivo transversal, en donde se ejecutó un análisis preciso de las muestras de suelo en la comunidad céntrica mientras que, la evaluación de cambio de uso del suelo de forma geoespacial entre el periodo de 2012 – 2021 se realizó a nivel del corregimiento.

3.4. Variables del estudio

- **Variables dependientes:** Propiedades físicas y químicas del suelo.
- **Variables independientes:** Uso del suelo, cambio de uso del suelo y topografía del terreno.

3.5. Recolección de muestras de suelo y datos geoespaciales

Se recolectaron 6 muestras de suelo en la comunidad céntrica de Achiote con un barreno holandés hasta los 20 cm de profundidad para su análisis de fertilidad en laboratorio, para la densidad aparente las muestras fueron obtenidas en forma superficial (0 – 5 cm) con el método del cilindro metálico.

Para el análisis del cambio de uso del suelo se recopilaron capas geoespaciales en medios de información oficiales de Información Geográfica como el GIS portal del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales y los datos abiertos del Ministerio de Ambiente, de los cuales se extrajeron referencia sobre la topografía, uso del suelo, cobertura boscosa e hidrología. Cabe señalar que, el muestreo de suelo fue realizada a nivel de comunidad, mientras que la evaluación de cambio de uso de suelo a nivel de corregimiento.



Figura 13: Vista satelital de puntos de muestro dentro de la comunidad de Achiote.

Fuente elaboración propia con tecnología de Google Earth Pro.



Figuras No.14, 15 y 16: Recolección de muestras de suelo en campo



Figuras No.17, 18 y 19: Método de cilindro metálico para densidad aparente

3.6. Análisis de propiedades físicas en laboratorio

1.6.1. Densidad aparente

Para el análisis de densidad aparente se determinó el volumen del cilindro ($V=\pi \cdot r^2 \cdot h$) para conocer su peso, una vez se obtiene este dato se realizó la extracción de la muestra en campo con ayuda de un martillo para realizar una leve presión evitando la compactación de la muestra y asegurándonos que la muestra quede a ras del anillo limpiando la vegetación excedente de la muestra. Se procedió a pesar la muestra húmeda y luego se registró el peso de la muestra seca al horno a 105 °C por 24 horas a temperatura constante y se estimó la densidad aparente y porcentaje de humedad mediante las siguientes operaciones:

$$Da = \frac{M_{ss} (105^{\circ}C)}{\text{Volumen del anillo}}$$



Figuras 20 y 21: Pesaje de muestras húmedas y secas

1.6.2. Densidad real

En la determinación de la densidad real se implementó el método del matraz aforado con alcohol, se pesaron 10 g de suelo seco que fueron transferidos a un matraz volumétrico de 25 ml con ayuda de un embudo y pincel para recaudar la mayoría de suelo posible, posterior a ello, en una probeta se añadieron 50 ml de alcohol etílico que fueron adicionados a los matraces con suelo lentamente hasta completar las líneas de aforo para agitarse y obtener el volumen de alcohol consumido en la bureta para la estimación de la densidad real:

$$Dr = \frac{\text{Masa de sólidos}}{V \text{ consumido de sólidos}}$$



Figura 22: Matraces volumétricos de 25 ml con alcohol etílico añadido

1.6.3. Porosidad

Las porosidades de las muestras analizadas fueron estimadas con ayuda de los datos obtenidos de densidad aparente y real antes calculados a través de la siguiente ecuación:

$$\% VTP = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100$$

1.6.4. Textura

La distribución de las partículas de las muestras de suelo (textura) fueron determinadas mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos. El procedimiento inició con la calibración del hidrómetro en una solución de 100 ml de solución dispersante al cilindro de sedimentación completando con agua destilada hasta la marca del litro, el hidrómetro fue añadido suavemente para registrar la lectura del blanco (L_{blanco}) y su temperatura (T_1).

Se pesaron 40 g suelo seco y 10 g para la determinación del porcentaje de humedad ($\%H$), los 40 g de suelo fueron añadidos en una copa de dispersión a la que se le agregó 100 ml de agua destilada y fue dejada 10 minutos en reposo. Los dispersores de las muestras fueron agitadas aproximadamente 20 minutos. Una vez pasado el tiempo los contenidos de suelo fueron transferidos al cilindro de sedimentación con ayuda de una botella lavadora, el volumen de la suspensión fue completado con agua destilada hasta la marca de un litro. Una vez completado el volumen de la suspensión, se añade el termómetro para registrar la temperatura en suspensión, es necesario sostenerlo para evitar que se una en el cilindro de sedimentación. Ya con la temperatura registrada, con ayuda del émbolo se agitó muy suavemente el material para evitar su desborde, lo que podría perjudicar el procedimiento.



Figuras 23 y 24: Cilindros sedimentarios; Método de Bouyoucos

Al retirar el émbolo, rápidamente se anotó el tiempo de sedimentación (cero), en esta ocasión, una vez registrada las primeras lecturas y temperaturas (LH1 y T1) se esperó dos horas para registrar las segundas lecturas (LH2 y T2) con ayuda del hidrómetro y termómetro. Es importante señalar que el hidrómetro está calibrado a una temperatura de 19.4 °C, por lo que las lecturas debieron ser corregidas, dependiendo de la temperatura se debe adicionar 0,3 unidades por °C. Para la determinación de los valores y correcciones se emplearon las siguientes ecuaciones:

Determinación de porcentaje de humedad: $\% H = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}} \times 100$

Masa de suelo seco: $M_{ss} = \frac{M_{sh}}{1 + (\frac{\% H}{100})}$

Corrección de temperatura: $Corrección\ de\ T = (°T\ de\ lectura - °T\ de\ referencia) \times 0,3$

Deducción de fracciones texturales: $\% Arena = 100 - \left[\frac{LH1\ corregida \times 100}{M_{ss}} \right]$

$\% Arcilla \left[\frac{LH2\ corregida}{M_{ss}} \right] \times 100$

$$\% \text{ Limo} = \left[\frac{LH1 \text{ corregida} - LH2 \text{ corregida}}{M_{ss}} \right] \times 100$$

Con las fracciones definidas en porcentaje se procedió a determinar la textura de las muestras con ayuda del triángulo textural.

1.6.5. Color

El color de las muestras en laboratorio fue identificado con las cartas de Munsell, se evaluó el color de las muestras húmedas (por su mayor representatividad) y secas. Las muestras se colocaron junto a las cartillas del sistema, mediante observación se diagnosticó el color con base en el matiz, croma y valor percibido.



Figuras 25 y 26: Evaluación de color con Sistema de Notación de Munsell

1.7. Análisis de propiedades químicas en laboratorio

1.7.1. pH

La evaluación del pH de las muestras en laboratorio se realizó mediante el uso del equipo de potenciómetro en una mezcla 1:2.5 sólido: agua. Se pesaron 10 g de suelo seco en un vaso químico de 50 ml a los que se le añadieron 25 ml de agua destilada, la mezcla fue agitada con ayuda de una varilla de vidrio para su homogenización y dejada en reposo por 60 minutos, pasado el tiempo se agitó nuevamente la mezcla durante 10

segundos antes de realizar la lectura en el equipo, una vez transcurrido el tiempo, el electrodo fue ligeramente colocado en la suspensión para su posterior lectura de pH.



Figura 27: Equipo potenciómetro

1.7.2. Contenido de nitrógeno

El contenido de nitrógeno en el suelo fue determinado con el método de Kjeldahl, para iniciar las muestras atravesaron un proceso de digestión en donde se pesó 1 g de suelo seco en un papel filtro que fue colocado dentro del tubo de digestión, se añadió una pastilla catalizadora de cobre de selenio y 20 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al tubo de digestión. Los tubos fueron colocados en el digestor Gerhardt y sellados con sus tapas.

El equipo Gerhardt fue encendido a una temperatura de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, el proceso de digestión duró aproximadamente una hora y media., en este tiempo se observaba un humo blanco dentro de los tubos que indicaba la pérdida de dióxido de carbono (CO_2), al finalizar la digestión los tubos fueron dejados a enfriar. Para el proceso de destilación, fue utilizado el equipo de digestión velp científica, donde se colocó un matraz con 80 ml de ácido bórico al 4 %, al iniciar la destilación el equipo automáticamente dispensó 60 ml de hidróxido de sodio al 50 % (NaOH) 60 ml de agua destilada. Una vez trascurrido el tiempo

de destilación, se procedió a titular las muestras con ácido clorhídrico (HCl 0.1N) hasta que el desarrollo de color de las muestras destiladas pasará de verde azulado a rojo chocolatoso.

Cálculo para la determinación del porcentaje de nitrógeno:

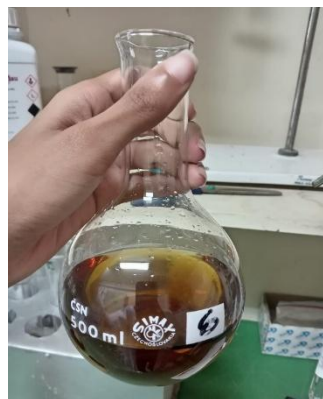
$$\% N = \frac{Vc \times N \times F \times 100}{g \text{ muestra}}$$

En donde:

- **Vc** = Volumen consumido de HCl
- **N** = normalidad del ácido utilizado
- **F** = factor 0.01401



Figuras 28 y 29: Equipo Gerhardt y velp scientifica



**Figura 30: Desarrollo de color chocolatoso después de la titulación
con HCl**

1.7.3. Contenido de fósforo

El análisis de contenido de fósforo se desarrolló con ayuda de un colorímetro, fueron pesados 5 g de suelo seco colocados en un matraz Erlenmeyer de 250 ml al cual se le agregaron 50 ml de solución extractora Mehlich, luego de agitar por 15 minutos, la solución fue filtrada con ayuda de un papel filtro para. Para el desarrollo de color, se tomó una alícuota de 5 ml de la solución a un vaso químico de 50 ml al cual fue agregado 10 ml de molibdato de amonio y 7 gotas de ácido ascórbico. Las soluciones fueron agitadas durante 30 minutos para el desarrollo del color azul, al agregar las muestras dentro del equipo se registraron las densidades de absorbancia a una longitud de 660 nm, las curvas de calibración fueron interpoladas en este valor.

En donde: ppm de P asimilable = ppm en solución x 100.

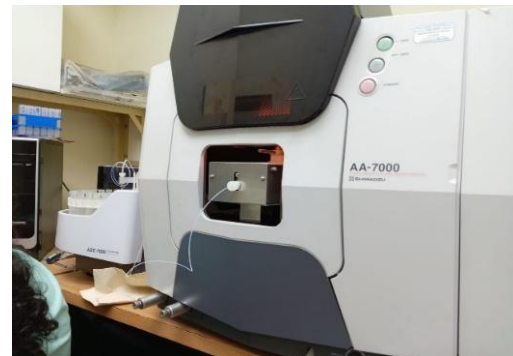


Figuras 31 y 32: Desarrollo de color y lectura de muestras en el colorímetro

1.7.4. Contenido de nutrientes

El contenido de nutrientes fue determinado mediante el método de espectroscopia de absorción atómica (EAA), se pesaron 5 g de suelo colocados en un matraz de 250 ml, se añadieron 50 ml de la solución extractora de ácidos dobles (HCl y H₂SO₄ 0.025 N). Las muestras fueron agitadas durante 15 minutos y filtradas a un vaso químico de 100 ml, posterior a ello, se realizaron disoluciones de las muestras con cloruro de lantano (LaCl₃) de 1:10 y se tomaron alícuotas de 2 ml y se agregaron 18 ml de LaCl₃ para hacer disoluciones de 1:100 de las soluciones.

Las lecturas en ppm de lo micronutrientes de las soluciones preparadas fueron realizadas de forma automática por el espectrofotómetro, en donde las muestras en lectura activaban la llama para su calcinación y posterior transformación en su forma atómica para la determinación de los valores de absorción de luz de las muestras.



Figuras 33 y 34: Empleo de equipo de absorción atómica

1.7.5. Conductividad eléctrica y salinidad del suelo

El análisis de conductividad eléctrica y salinidad del suelo se llevó a cabo con ayuda de un conductímetro de soluciones salinas. Fueron pesados 25 g de suelo de cada muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml a los que se le añadieron 50 ml de agua destilada y

fueron pasados al agitador durante 15 minutos, transcurrido el tiempo, la suspensión fue filtrada con ayuda de un embudo y papel filtro en un vaso químico de 50 ml. El conductímetro fue calibrado con soluciones salinas conocidas para su posterior introducción en los suelos filtrados para su lectura.

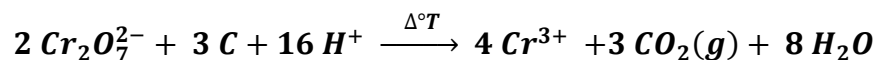


Figura 35 y 36: Filtrado de muestras y lectura de muestras por conductímetro

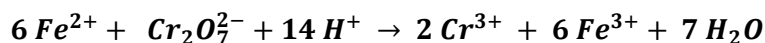
1.7.6. Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica fue determinado con el método de Walkley & Black, es importante señalar que en este procedimiento las formas orgánicas del carbono se oxidan con el exceso de dicromato de potasio. Dentro de este procedimiento se dan dos reacciones químicas:

1. Donde la cantidad de dicromato reducido se relaciona numéricamente con el contenido de carbono orgánico de las muestras:



2. Mediante la titulación inversa del dicromato no consumido por el carbono orgánico realizada por reducción con el reactivo sulfato ferroso en presencia de un indicador:



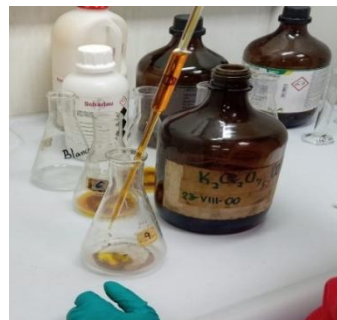
Fueron pesados 0.5 g de suelo transferidos a un matraz Erlenmeyer de 500 ml, al mismo tiempo se preparó un blanco (muestra sin suelo), los matraces fueron colocados dentro de una cámara de extracción a los cuales se le añadieron 10 ml de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1.0N) y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), se agitaron para mezcla entre el suelo y los dos reactivos.

Las muestras fueron dejadas en reposo en la cámara de extracción durante 30 minutos, pasado el tiempo se le agregaron 200 ml de agua destilada, 10 ml de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4) y 20 gotas del indicador difenilamina. Posterior a ello, las soluciones fueron tituladas con el sulfato ferroso que junto al indicador fueron cambiando el color de las muestras a un púrpura azulado, la velocidad de titulación con el sulfato ferroso fue reducida gota a gota hasta obtener un color verde brillante que indicó el final del procedimiento. Los cálculos desarrollados para este método fueron:

$$\% \text{M.O.} = 10 \left(1 - \frac{V_{\text{blanco}}}{V_{\text{muestra}}} \right) \times F$$

- V_{blanco} = valoración del blanco (mL de la solución de FeSO_4)
- V_{muestra} = valoración de la muestra (mL de la solución de FeSO_4)
- F = factor (1.34 para los 0.5g de suelo)

Determinación del porcentaje de carbono orgánico: $\% \text{C} = \frac{\% \text{M.O.}}{1.724}$



Figuras 37 y 38: Preparación de muestras y adición de los 10 ml de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$ 1.0N)



Figuras 39 y 40: Adición de los 20 ml H_2SO_4 y 200 ml a agua destilada



Figuras 41 y 42: Adición de los 10 ml de H_3PO



Figuras 43 y 44: Titulación de muestras con sulfato ferroso



Figura 45: Desarrollo de color verde

1.7.7. Concentración de acidez intercambiable

En la determinación de la acidez intercambiable de las muestras se pesaron 2.5 g de suelo seco en un matraz Erlenmeyer de 125 ml al cual se le adicionaron 25 ml de cloruro de potasio KCl (solución extractora) después de ser agitados durante 15 minutos se filtró la solución en un vaso químico de 125 ml. La solución fue transferida a una alícuota de 10 ml a un frasco de 125 ml al cual se le añadieron 3 gotas de fenolftaleína (indicador). La titulación se realizó con hidróxido de sodio (NaOH 0.01N) hasta que un color rosado se presente por más de 30 segundos, el volumen consumido del hidróxido de sodio (NaOH 0.01N) correspondió a la acidez intercambiable de (H + Al). Una vez registrado

el volumen consumido, se adicionó una gota de cloruro de hidrógeno (HCl 0.01 N) a la solución titulada hasta que se retire el color. Al eliminar el color, se le agregan 5 ml de fluoruro de sodio (NaF) al 4 %, si el color rosado aparece nuevamente, significa que hay la presencia de aluminio en la solución.

3.8. Procesamiento de datos geoespaciales y confección de mapas

El análisis de los datos geoespaciales y diseño de los mapas fue realizado en la aplicación de ArGIS Pro, en donde se logró registra de forma geomática a través de modelos digitales de elevación, las características de relieve, uso de suelo en los años 2012 y 2021 en formato vectorial, cobertura boscosa y redes hídricas.

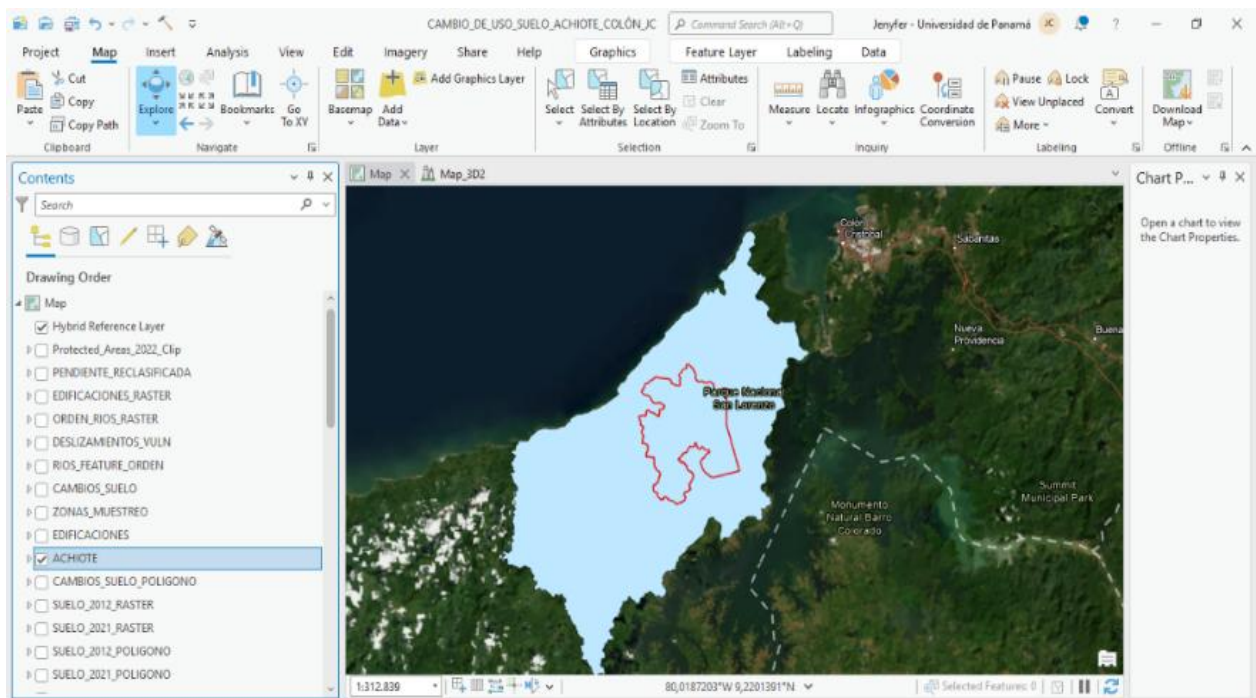


Figura 46: Interfaz de la aplicación ArGIS Pro

3.9. Diagnóstico del cambio de uso del suelo entre los años 2012 y 2021

El diagnóstico del cambio de uso del suelo en el área de estudio fue determinado mediante el empleo de la herramienta de geoprocésamiento llamada “*Compute Change Raster*” a través de la comparativa de las capas de uso del suelo en los años 2012 y 2021 extraídas de la geodatabase oficial del Ministerio de Ambiente para la determinación del porcentaje de cambio de uso del suelo dentro del área de estudio. Las categorías de interés evaluadas fueron:

- Bosque (maduro y secundario)
- Pasto
- Rastrojo y vegetación arbustiva
- Vegetación herbácea
- Superficie de agua y afloramiento rocoso
- Infraestructuras y áreas pobladas

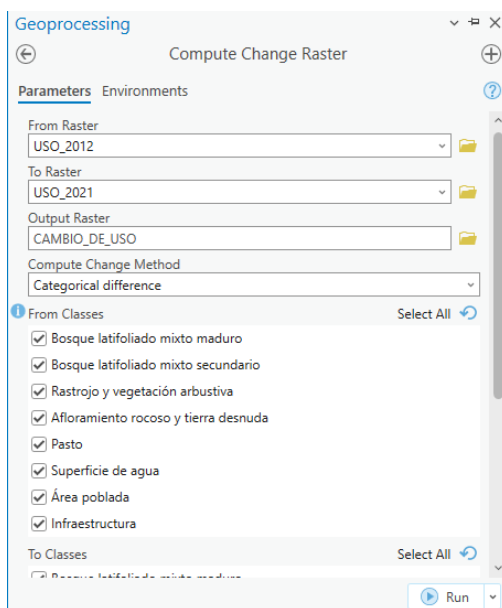


Figura 47: Herramienta “*Compute Change Raster*” para la determinación del cambio de uso del suelo entre los años 2012 – 2021.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1 Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio forma parte del distrito de Chagres, dentro de la Costa Abajo de la provincia de Colón es la vía terrestre principal que conecta la ciudad de Colón con otras comunidades aledañas de la costa caribeña con alrededor 6,203.85 ha de área. Según el último censo realizado en el país, corregimiento de Achiote posee una población total de 938 habitantes y una densidad poblacional de 15.1 habitantes/km² (INEC, 2023).

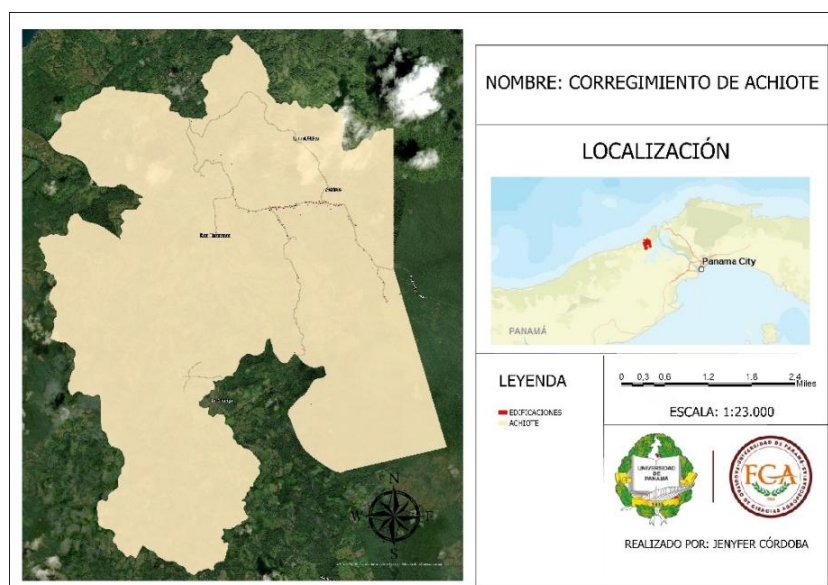


Figura 48: Corregimiento de Achiote. Elaboración propia.

4.1.1. Clima

Las condiciones de la región definen a la zona climática como tropical monzónica, temperatura promedio de 26 °C muy variante a lo largo del año, las precipitaciones anuales se aproximan a los 3,400 mm y la humedad relativa alcanza hasta un 85 % dentro de la zona (Arcia & Klein, 2017).

4.1.2. Geología

De acuerdo con el mapa geológico de la república de Panamá generado en la geodatabase del STRI GIS Data Portal de **Solano (2025)**, la expansión del área de estudio se encuentra conformado por rocas sedimentarias formadas por arenisca maciza de gano fino con símbolo de representación TLP-Ch.

4.1.3. Suelos

Dentro del área de estudio predominan suelos del orden Inceptisol, alfisol y ultisol. Los suelos del orden inceptisol suelen presentarse en regiones húmedas y subhúmedas que poseen condiciones de desarrollo intermedio, su principal horizonte diagnóstico es el cámbico y guarda relación con la roca madre del suelo, en este orden se presentan horizontes alterados por la pérdida de bases, hierro y aluminio. Por otra parte, los suelos alfisoles son suelos más maduros ricos en óxidos de aluminio y hierro, su fertilidad es de media-baja con un contenido de bases intercambiables del 50 % de Ca, Mg, Na y K y pH ligeramente ácidos a muy ácidos. Por último, los suelos ultisoles exhiben condiciones altas de desarrollo en zonas húmedas con una saturación de bases del 35 % con pH ácidos a muy ácidos, por lo general, de color rojizo a amarillo y textura arcillosa, suelen ser de los más abundantes (**INETER, 2021**).

4.1.4. Relieve

Mediante el análisis geoespacial, se detectó que gran parte de la topografía del área de estudio se encuentra predominado por pendientes que van desde planas hasta escapadas. Se logra visualizar que gran parte de los límites del oeste, sureste,

suroeste y noreste de la región se encuentra dominado por la presencia de pendientes que varían entre los 3 % – 75 % de inclinación. Siendo las pendientes de 12 % - 25 % y 25 % - 50 % las más predominantes.

Con respecto a la capacidad agrológica mediante la capa de la capacidad agrológica de los suelos en Panama **Solano (2019)** dentro de la zona de estudio se presentan suelos de clase IV que presentan fuerte limitaciones para la actividad agrícola, sin embargo, permite el desarrollo de cultivos anuales con prácticas adecuadas de conservación, suelos de clase VI dedicados a la actividad forestal y desarrollo de cultivos permanentes como los frutales. Por otro lado, gran parte de territorio se presentan suelos de clase VIII dedicados únicamente a la conservación de la flora y fauna silvestre y ningún tipo de actividad antrópica (**MIRENEM, 1995**).

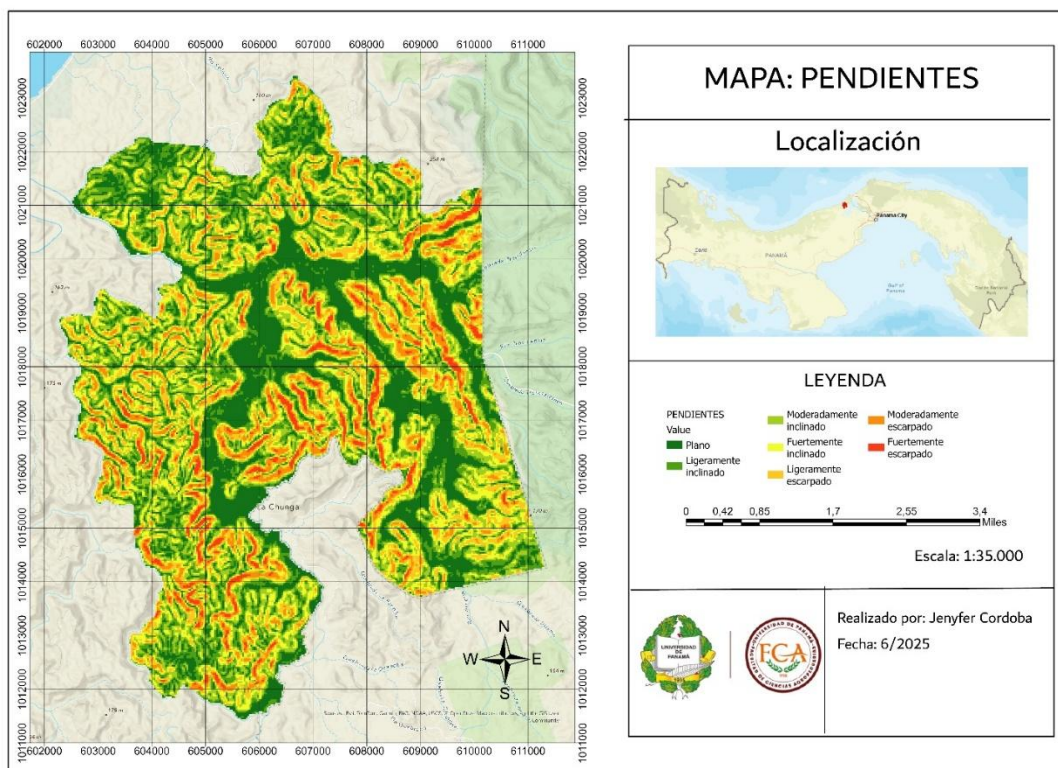


Figura 49: Mapa de pendientes presentes dentro del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Hidrología

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca No.113 denominada Ríos entre el Indio y el Chagres con un área de aproximadamente 43,644.97 ha (439.45 km²) y un perímetro de 116.01 km, su río principal es el río Lagarto el cual atraviesa la zona de estudio drena hacia el mar Caribe (**STRI GIS Portal, 2024**). Dicho río también se encuentra relacionado con otra cuenca de interés cercana a lugar de análisis, la cuenca No.111 Río Indio de la cual también forma parte. Mientras que el cauce principal de Achiote es el río Providencia con una longitud de 8.36 km.

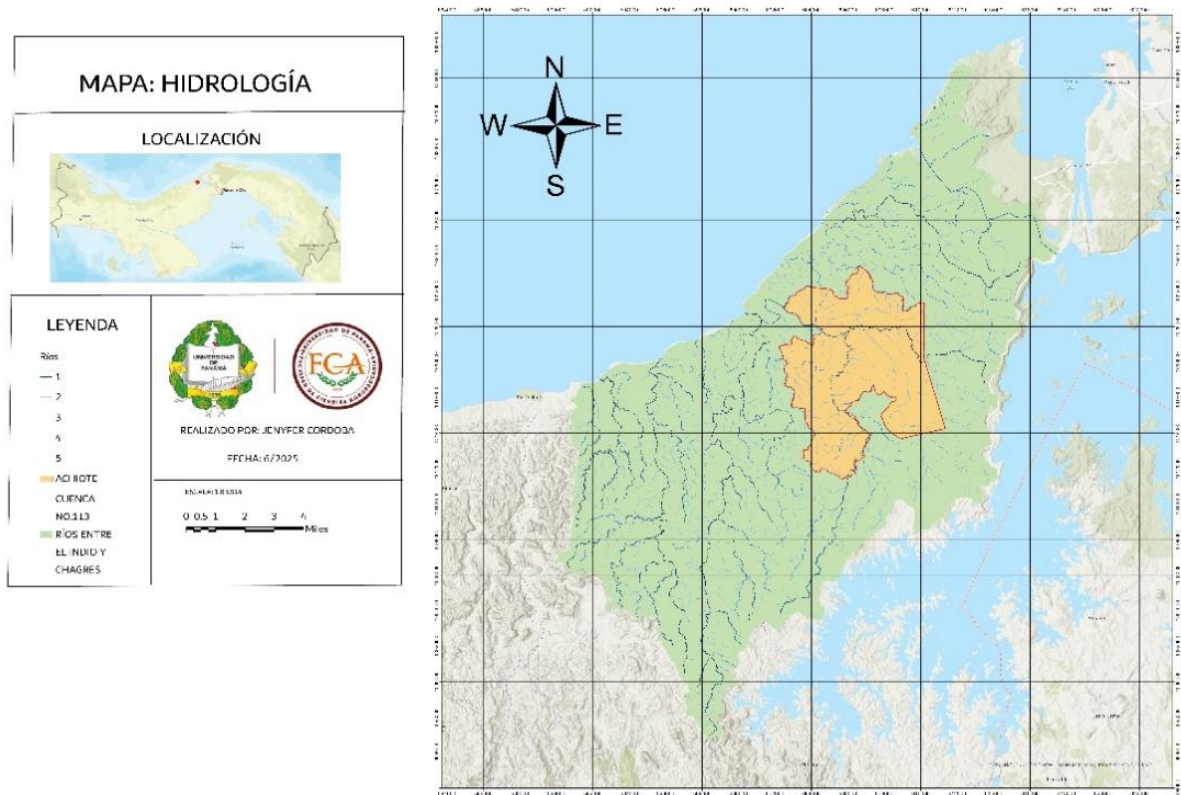


Figura 50: Mapa de hidrología. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Propiedades físicas del suelo

4.2.1. Textura

De acuerdo con los diagnósticos de los porcentajes granulométricos (arena-limo-arcilla) de las muestras se obtuvieron texturas que variaron de franco arcilla arenosa a arcillosas.

Tabla No. 5 - Clases texturales obtenidas. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textural
1	62	17	21	Franco arcilla arenosa
2	3	37	60	Arcilla
3	24	28	48	Arcilla
4	46	22	32	Franco arcilla arenosa
5	39	22	39	Franco arcilla
6	55	19	26	Franco arcilla arenosa

Dentro del análisis de laboratorio se mostró una variancia textural se obtuvieron texturas arcillosa con 60 y 48 % de arcillas, este tipo de textura suele ser difícil de trabajar por su alta capacidad de retención de agua lo que crea condiciones desfavorables para los cultivos, texturas franco arcillosas con 39 % de arcillas, que a pesar de ser es más fáciles de trabajar en comparación con la arcillosa, ambas son consideradas texturas pesadas que requieren prácticas de manejo para su productividad, y la texturas franco arcillo arenosas con 62, 46 y 55 % de predominancia de arena siendo más ligera. Del mismo modo, **Choque-Conde et al. (2023)** hallaron como resultado de 469 muestras que el 3 % pertenecían texturas ligeras, 77 % medias y 20 % pesadas. Dichos resultados coinciden con los obtenidos en esta investigación, esto se puede explicarse porque a

pesar de ser suelos de regiones diferentes ambos suelos pudieron estar sometidos a condiciones similares de meteorización del material parental.

4.2.2. Densidad aparente, real y porosidad

Al constituir un indicador de calidad de suelo, la densidad aparente permitió conocer las condiciones de porosidad, grado de aireación y movimiento del agua a través del suelo.

Tabla No. 6 - Resultado de densidades aparentes, reales y porcentajes de porosidad de muestras. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)
1	0.73	1.95	62.42
2	0.76	1.76	56.81
3	0.71	1.92	63.50
4	1.04	2.28	53.54
5	0.88	2.20	60.00
6	0.75	1.97	61.89

Los valores de densidad aparente (D_a) en su mayoría fueron bajos 0,71 a 1,04 g/cm³ la variación de la D_a se pudo haber visto influenciada por el tipo de textura, estructura, materia orgánica, compactación y contenido de humedad, estos valores bajos pueden indicar un buen estado físico del suelo, mientras que la densidad real presentó valores inferiores 1,76 – 2,28 g/cm³ al promedio estándar de los suelos minerales (2,65 g/cm³). Ambos valores permitieron estimar las porosidades de 53 – 63 % comunes en suelos pesados con buen contenido de materia orgánica y poca compactación. Por parte de la densidad aparente es correcto que el valor se vio muy influenciado por las condiciones

de humedad al momento de realizar el muestreo, en relación con la densidad real, el secado de las muestras y el tipo de uso a los cuales estaban sometidos los suelos muestreados pudieron influir en su resultado. Mientras que, por parte de la porosidad, es correcto que la labranza extensiva puede llegar a generar condiciones de reducción por efectos de compactación aumentando la densidad aparente lo que se traduce a una afectación de la porosidad. Lo que coincide con lo que señalan otros autores como **Cid et al. (2017)** que también reconoce que uno de los principales factores que altera el valor de la densidad aparente, es el contenido de humedad presente al momento de tomar las muestras. Por su parte, **Medina et al. (2006)** señala que la densidad real puede sufrir leves variaciones al aumentar el tiempo de uso en un sistema de producción temporal y **López et al. (2016)** reconoce que a partir de la expansión de terrenos sometidos a siembra directa (SD) se pueden presentar afectación en la macroporosidad del suelo.

4.2.3. Color

Tabla No. 7 - Resultado de colores. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	M. Seca	Designación	M. Húmeda	Designación
1	10 YR 3/6	Marrón amarillento oscuro	7.5 YR 3/3	Marrón oscuro
2	10 YR 6/3	Marrón pálido	10 YR 3/2	Marrón grisáceo muy oscuro
3	10 YR 5/4	Marrón amarillento	10 YR 3/2	Marrón grisáceo muy oscuro
4	10 YR 5/3	Marrón	10 YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro
5	10 YR 6/4	Marrón amarillento claro	10 YR 4/3	Marrón
6	10 YR 5/6	Marrón amarillento	5 YR 5/4	Marrón rojizo

Es necesario resaltar que los colores evaluados que varían desde marrón oscuro hasta marrón amarillento pueden verse muy relacionados con el contenido de materia orgánicas presente en el área de estudio, la presencia de compuestos químicos como el hierro o la naturaleza mineral del material parental. Asimismo, **Domínguez et al. (2011)** que con ayuda del método de notación de Munsell encontró coloraciones desde amarillas pálidas a rojizas entre 2.5 YR hasta 10 YR, lo que coincide con los resultados también obtenidos en esta investigación, reconoce que esta propiedad en muchas ocasiones suele ser subjetiva dependiendo de la observación de cada evaluador.

4.3. Propiedades químicas del suelo

4.3.1. pH

Tabla No. 8 - pH de muestras analizadas. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	pH en agua (1:2.5)
1	6.06
2	6.27
3	6.04
4	5.97
5	5.87
6	5.31

Las seis muestras analizadas presentaron pH ácidos a poco ácidos, característica muy común de los suelos de Panamá, las muestras con pH de 6.27 a 6.04 son considerados poco ácidos, mientras que, las muestras con pH de 5.97 a 5.31 son ácidos. Es necesario resaltar que mucho antes de realizar este diagnóstico se predijo que el pH de las muestras sería ácido, principalmente por la observación del tipo de cultivos que se

presentaban dentro de la comunidad de Achiote como lo son la yuca, plátano, mango, marañón y cítricos, especies tolerantes a condiciones ácidas.

4.3.2 Contenido de macro y micronutrientes.

Tabla No. 9 - Contenido de macronutrientes. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	Macronutrientes				
	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca (meq/100)	Mg (meq/100)
1	0.22	19.06	57.08	25.39	7.86
2	0.41	20.87	91.81	21.14	7.47
3	0.26	6.49	56.51	21.10	7.30
4	0.27	1.52	197.62	14.89	8.26
5	0.25	0.97	74.05	9.67	8.90
6	0.19	9.08	60.62	14.24	7.89

N= nitrógeno, P= fósforo, K= potasio, Ca= calcio, Mg= magnesio.

Tabla No. 10 - Contenido de micronutrientes. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	Micronutrientes (ppm)			
	Fe	Cu	Mn	Zn
1	200.48	2.59	43.54	5.48
2	104.18	3.16	66.35	8.02
3	73.86	2.99	18.65	3.31
4	63.27	1.52	30.25	4.06
5	83.77	2.60	47.28	3.18
6	338.41	3.97	84.01	4.55

Fe= hierro, Cu= cobre, Mn= manganeso, Zn= zinc.

La interpretación para definir los rangos de concentración alto, medio y bajo se basaron en la tabla de evaluación de características determinadas del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. Referente a los macronutrientes, todas las concentraciones de nitrógeno N son consideradas altas, el fósforo P en su mayoría es bajo a excepción de las dos primeras muestras que son medias, para el potasio en general son medias a excepción de la cuarta muestra que es alta en contenido de K, en cuanto al calcio Ca y Mg todas sus concentraciones fueron altas. Por parte de los micronutrientes el contenido de hierro Fe varío de alto a medio al igual que el manganeso Mn, el cobre de medio a bajo y el zinc en general fue bajo a distinción de la primera muestra que es media. La mayoría de las concentraciones de nutrientes y pH obtenidos coinciden con los resultados evidenciados de la zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes realizado por **(Villareal et al., 2013)**.

4.3.3. Conductividad eléctrica, salinidad y contenido de sodio

Los resultados obtenidos de la conductividad eléctrica permitieron identificar rangos bajos de salinidad, a su vez, también se asoció el contenido de sodio presente en las muestras.

Todas las muestras arrojaron niveles bajo de salinidad (83 – 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sin embargo, se presentaron concentraciones altas de sodio, siendo las muestras número uno y tres las de mayor concentración de Na (371.48 y 287.03 ppm). Las bajas condiciones de salinidad pueden deberse a la pérdida de sales por procesos de erosión, lixiviación o el uso de enmiendas, por su parte, las altas concentraciones de sodio obtenidas pueden atribuirse de forma natural por los procesos de meteorización de compuestos minerales con altos contenido de sodio o la cercanía del área de estudio a zonas costeras

lo que induce a la introducción del agua del mar al suelo y la aplicación de agua de riego con alto contenido de sodio, este exceso de sodio puede generar consecuencias nutricionales, logrando afectar el contenido de potasio u otros nutrientes esenciales, alterar la estructura del suelo y generar estrés hídrico en los cultivos. No obstante, estos resultados contradicen a lo que menciona **Bosh et al. (2012)** donde expresa existe una fuerte correlación entre la conductividad eléctrica aparente y el contenido de sodio soluble del suelo, debido que, en este caso, se presentó una relación inversamente proporcional.

Tabla No. 11 - Caracterización de salinidad; $\mu\text{S/cm}$ = microsiemens por centímetro, dS/m = decisiemens por metro, Na= sodio. Fuente elaboración propia.

No. Muestra	CE ($\mu\text{S/cm}$)	CE (dS/m)	Descripción	Na (ppm)
1	115.6	0.1156	Suelo no salino	371.48
2	244.1	0.2441	Suelo no salino	248.30
3	83.42	0.08342	Suelo no salino	287.03
4	84.48	0.08448	Suelo no salino	211.37
5	93.99	0.09399	Suelo no salino	216.21
6	115.2	0.1155	Suelo no salino	163.32

4.3.4. Contenido de materia orgánica y carbono orgánico

Los contenidos de materia orgánica mostraron condiciones bajas a medias en las muestras analizadas.

Tabla No. 12 - Presencia de materia orgánica; % M.O.= Contenido de materia orgánica porcentual, %C= contenido de carbono orgánico. Fuente: Elaboración propia.

No. Muestra	% MO	% C
1	2.32	1.35
2	5.03	2.91
3	2.71	1.57
4	3.09	1.79
5	3.61	2.09
6	1.03	0.60

Los contenidos de las muestras fueron en su mayoría bajos, siendo solo la segunda muestra de valor medio (5.02 %) y contenido de carbono orgánico (2.91 %) se hace necesario destacar que las condiciones de las zonas de muestro influyeron, el punto de muestreo dos de mayor contenido de MO presentó una alta densidad de árboles y cultivos de cobertura, mientras que la muestra seis al ser tomada en un suelo de utilidad ganadera el porcentaje de materia orgánica fue el menor. De hecho, **Núñez et al. (2011)** de igual forma observó que en un sistema agroforestal el aumento del contenido de materia orgánica de 0.51 a 3.85 % y produjo mejoras en otras propiedades del suelo. Este resultado se ajusta con los obtenidos al tomar en cuenta de que el tipo de condición y uso del suelo influye sobre el contenido de materia orgánica.

4.3.5. Concentración de acidez y contenido de aluminio

Tabla No. 13 - Acidez intercambiable y contenido de Al= aluminio. Fuente: *Elaboración propia.*

No. Muestra	Acidez intercambiable (H ⁺ Al ³⁺)	Al
	meq/100g	
1	0.2	0.0
2	0.3	0.0
3	0.3	0.0
4	0.3	0.0
5	0.3	0.0
6	1.2	0.0

Paralelamente, los contenidos de acidez intercambiable y aluminio del suelo fueron bajos en donde la acidez intercambiable no superó los 0.3 meq/100g de suelo, mientras que, el contenido de aluminio también se mantuvo bajo, lo que congruente con la baja acidez, esto puede deberse por los diferentes tipos de material parental, aplicación de enmiendas de encalado, pérdidas por lixiviación o el contenido de materia orgánica en el suelo. En su caso, **Oliva (2009)** sustenta que la concentración de la acidez intercambiable de (H⁺ + Al³⁺) aumenta en pH más bajos. Sus resultados difieren con los de esta investigación ya que a pesar de que se presentaron pH ácidos, el contenido de acidez intercambiable y aluminio fue bajo.

4.4. Uso del suelo y cobertura boscosa en los años 2012 y 2021

4.4.1. Condición en 2012

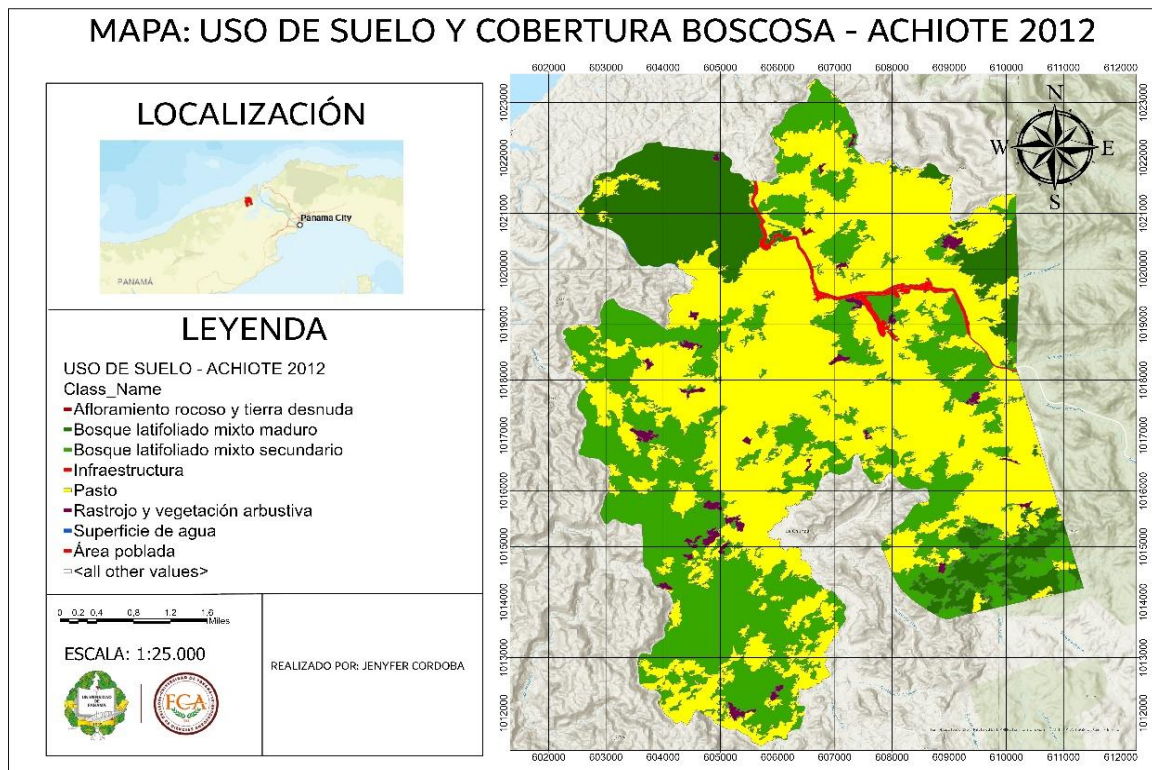


Figura 51: Mapa de uso de suelo y cobertura boscosa en Achiote, año 2012. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y cobertura boscosa - 2012

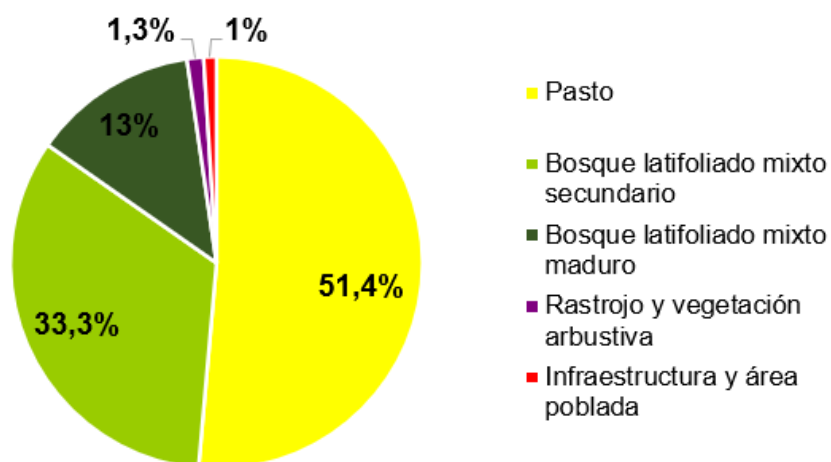


Gráfico No.2: Cobertura de bosques y uso de suelo en el año 2012. Fuente: Elaboración propia.

El mapa del 2012 refleja que gran parte del territorio se encontraba cubierto por áreas de pastos en 3,191 ha, lo que representa el 51.4 % del territorio total, por parte de la cobertura boscosa, las áreas de bosque secundario ocupaban unas 2,065 ha, lo que representa el 33.3 %, superando a las áreas de bosque primario que ocupaban apenas 809 ha siendo el 13 %, esto puede deberse a la intervención humana en el bosque virgen lo que condicionó el origen de áreas de bosque secundario. Las áreas de rastrojos se extendían en 78 ha, es decir, 1,3 % de ocupación, mientras que, las infraestructuras y áreas pobladas en conjunto abarcan 63 ha lo que representó el 1 % del territorio total.

4.4.2. Condición en 2021

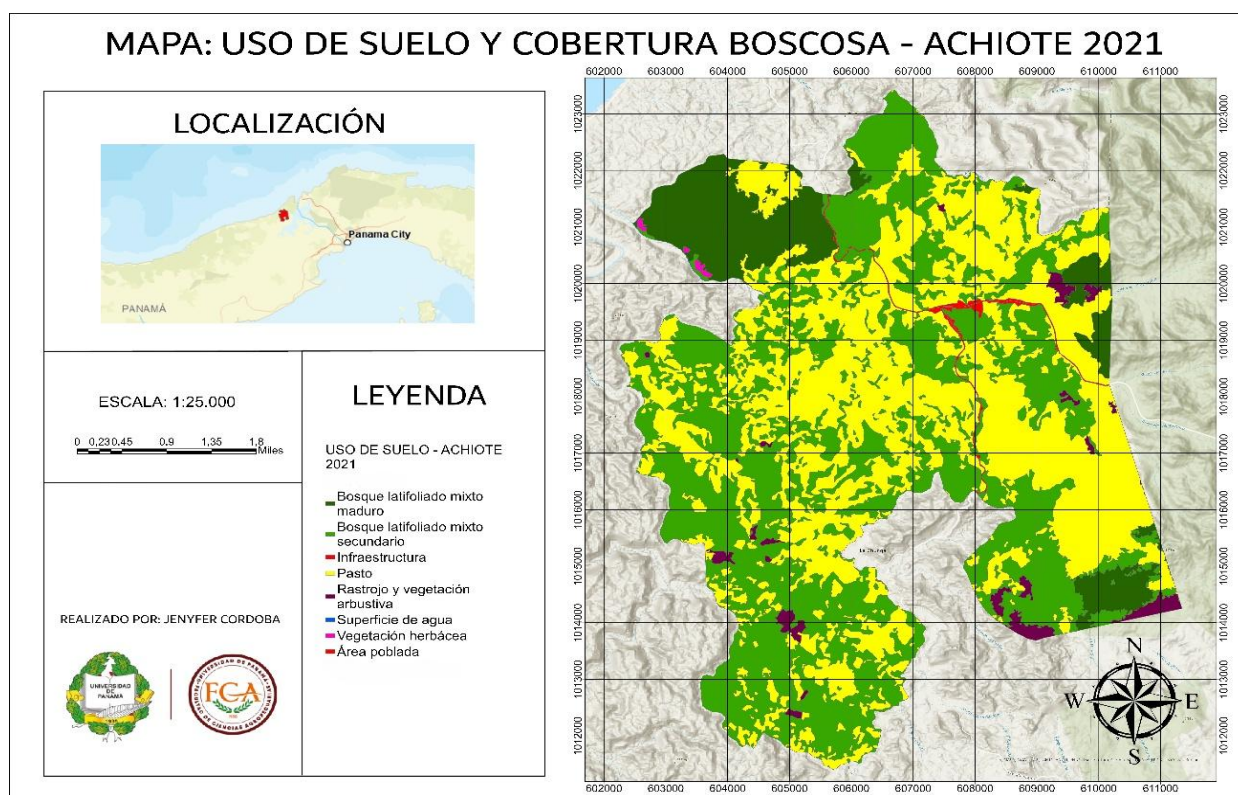


Figura 52: Mapa de uso de suelo y cobertura boscosa en Achiote, año 2021. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo y cobertura boscosa - 2021

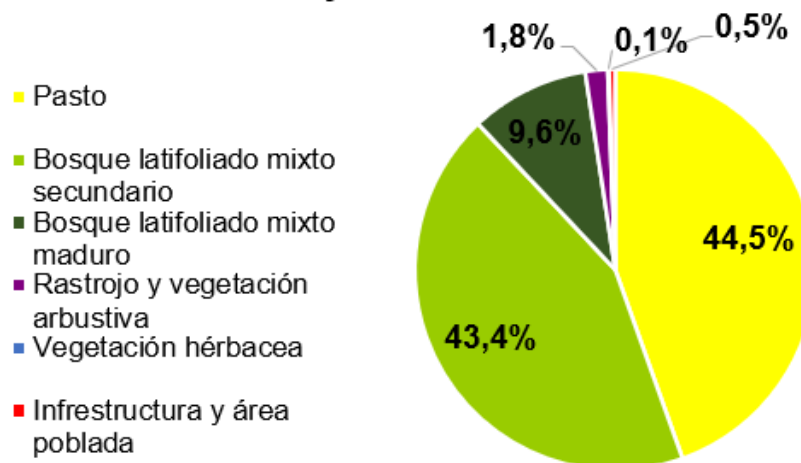


Gráfico No.3: Cobertura de bosques y uso de suelo en el año 2021. Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2021, la proporción de las áreas de pasto tuvo una tendencia de reducción a 2,761 ha lo que representa el 44.5 %, mientras que, las áreas de bosque secundario aumentaron a 2,696.7 ha en el 2021, lo que representa el 43.4 %. El área de rastrojo y vegetación arbustiva incrementó a 110.6 ha (1,8 %) muy probablemente ocasionado por la intervención del bosque quedando estos como restantes, el área del bosque primario siguió su disminución a 599.1 ha decreciendo del 13 % en 2012 a un 9,6 % para el 2021, también se muestra una nueva variable que es el área de vegetación herbácea con apenas 6.5 ha (0.1 %). Las categorías de infraestructura y población para la representación del factor social para el 2021 mostró un aminoramiento del área poblada a 15.3 ha, lo que representa el 0,5 % lo que puede deberse a al desplazamiento de personas a otras localidades de la provincia de Colón o el país. En síntesis, entre ambos años se observa una dinámica de reducción del 7 % del área pasto y un incremento del 10 % del área de bosque secundario.

4.5. Cambio de uso del suelo entre los años 2012 y 2021

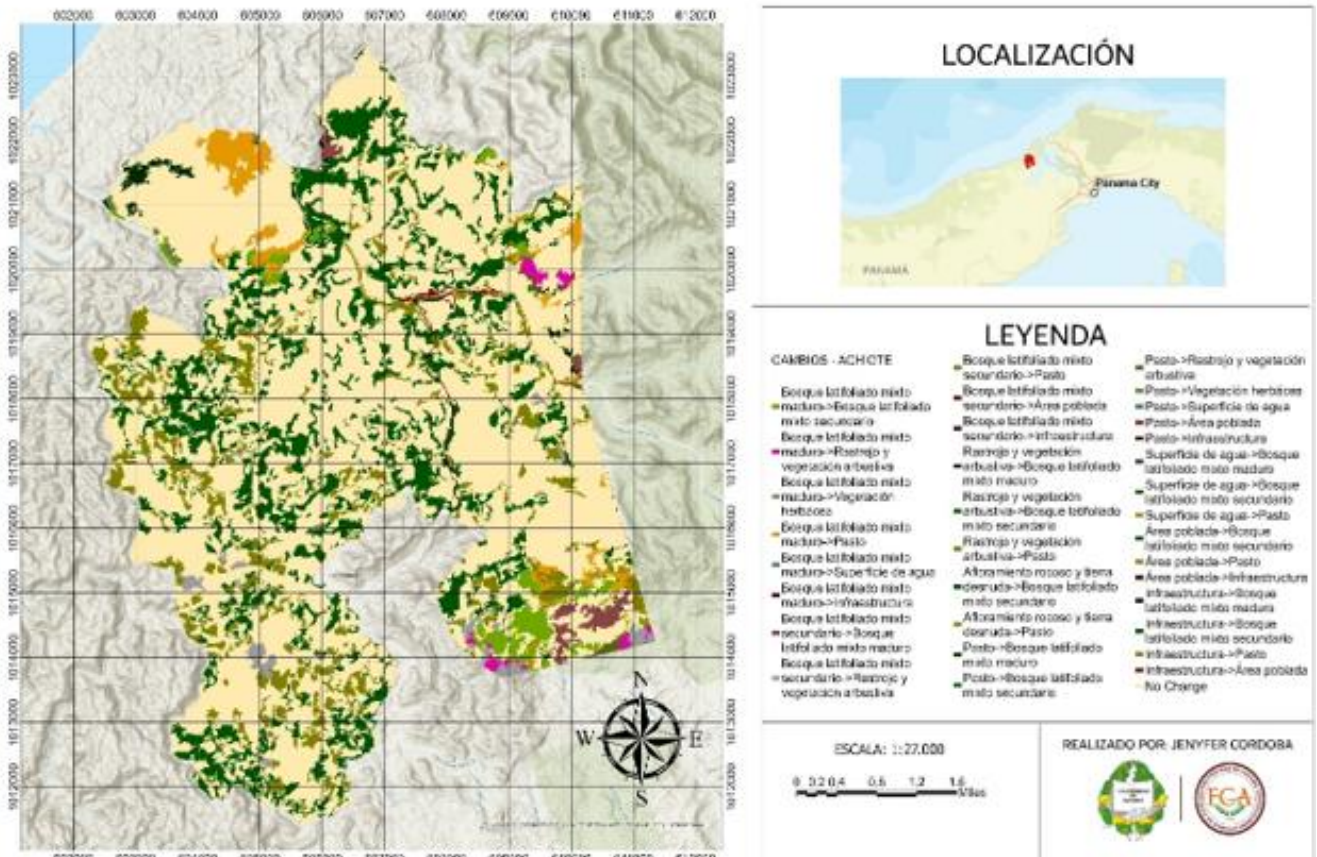


Figura 53: Mapa de cambio de uso de suelo entre los años 2012 y 2021 en Achiote. Fuente: Elaboración propia.

Los cambios de uso y cobertura boscosa fueron muy variados a lo largo de los años estudiados, sin embargo, para la evaluación y análisis se escogieron los resultados más representativos debido a que muchos de ellos poseen una tasa de cambio que no supera el 0.1 % y pueden hacer engorrosa la interpretación de la gráfica porcentual.

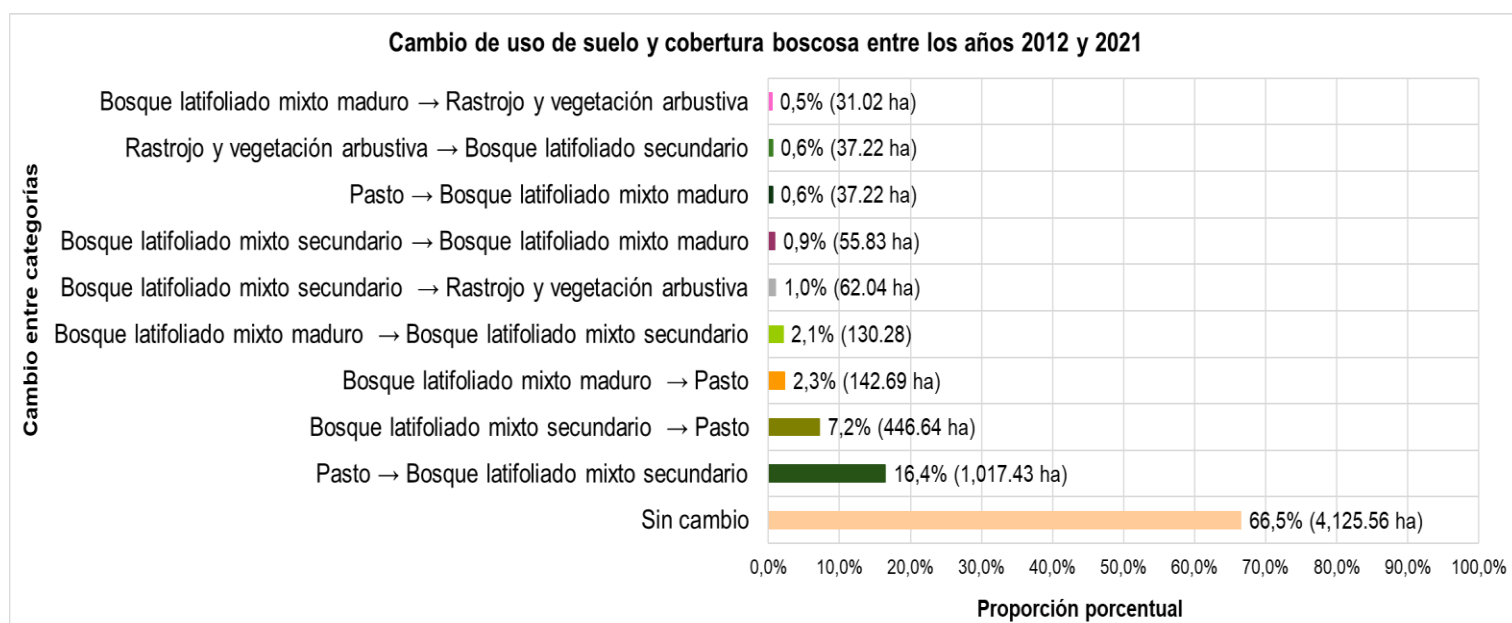


Gráfico No.4: Cambios de uso de suelo y cobertura boscosa entre los años 2012 a 2021. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de geoespacial reconoció que 4,125.56 ha lo que representa el 66.5 % no sufrieron cambios significativos durante los años, sin embargo, se hace necesario resaltar que 2,078.29 ha, es decir, un 33.5 % del área de estudio sí estuvieron sujetas a cambio por el desarrollo de actividades humanas. Se observa un incremento del área del bosque secundario en 1,017.43 ha (16,4 %), simultáneamente las áreas de coberturas boscosas pasaron a ser zonas de pasto. El área de bosque latifoliado mixto secundario pasó a ser área de pasto en 446.68 ha lo que representa el 7,2 % y el área del bosque latifoliado mixto maduro cambió a áreas de pasto en 142.69 ha (2,3 %), mientras que, el área de bosque latifoliado mixto maduro fue transformado a áreas de bosque latifoliado mixto secundario en 130.28 ha lo que representa el 2,1 % por intervención humana. Una sección del área de bosque secundario mixto latifoliado intervenido se convirtió en área de rastrojo en 62.04 ha (1.0 %) mientras que, otra parte pasó a ser área de bosque maduro de vuelta en 55.83 ha lo que representa el 0.9 %. Parte de las áreas de pastos

y rastrojos dieron origen o facilitaron la regeneración de las áreas de bosques maduros y secundarios en 37.22 ha lo que representa el 0.6 % simultáneamente, a diferencia de una porción del área de bosque maduro que pasó a ser área de rastrojo en 31.02 ha lo que simboliza el 0,5 %. La dinámica hallada en la comunidad de Achioté mostró un incremento neto significativo de bosque secundario de un 16,4 %. Este incremento porcentual del bosque secundario en Achioté se distingue de la tendencia nacional de deforestación en Panamá, donde la pérdida de la cobertura boscosa sigue relacionándose con los cambios de uso de suelo y expansión de actividades agropecuarias. Desde un punto de vista más técnico, este descubrimiento evidencia la capacidad de resiliencia ecológica y el fundamental papel del bosque secundario como componente clave en la restauración de ecosistemas degradados.

De forma complementaria, datos recientes del **INEC (2011, 2024)** muestran que el corregimiento de Achioté experimentó una fragmentación productiva entre los años. La superficie de explotaciones se redujo a 1,444.22 ha, pasando de 3,571.14 ha en 2011 a 2,126.92 ha en 2024, sin embargo, el número de explotaciones agropecuarias se duplicó de 126 en 2011 a 245 en 2024 siendo los cultivos anuales, permanentes y pastos naturales los de mayor incremento, lo que evidencia una mayor concentración de unidades productivas de menor escala. En cuanto a las actividades agropecuarias específicas, el sector agrícola presentó un aumento que no solo suma a 26 productores, sino que también, expande su superficie a 838.63 ha en el 2024, al igual que la actividad pecuaria, que mostró un crecimiento en el número de productores a 52 en 2024, lo que refleja una intensificación del uso de la tierra en Achioté para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas en pequeñas unidades productivas

5. CONCLUSIONES

Con ayuda del sistema de información geográfica se describieron las características topográficas e hidrologías del área de estudio, se identificó la predominancia de pendientes que varían de planas a muy escarpadas desde un 3 % hasta 75 % con suelos de orden inceptisol, alfisol y ultisol en su mayoría de una capacidad agrológica IV, IV y VIII que presentan limitaciones para el desarrollo de actividades agrícolas intensivas, sin embargo, adecuados para el desarrollo forestal, agroforestal y conservación de la flora y fauna silvestre. En cuanto su hidrología, se detalló que Achiote forma parte de la cuenca No.113 llamada Ríos entre el Indio y el Chagres con un área de 23,644.97 ha y un perímetro de 116.01 km, siendo su río principal el río Lagarto para la cuenca y el río Providencia con 8.36 km de longitud para la comunidad de Achiote con una población total de 938 habitantes.

De seis puntos estratégicos y su análisis de fertilidad de suelo, se determinaron las clases texturales franco arcilla arenosa con contenidos de hasta un 62 % de arena a arcillosas con una proporción de 60 % de arcilla, las densidades aparentes presentaron valores de 0.71 – 1.04 g/cm³ y las densidades reales 1.76 – 2.28 g/cm³, lo que condicionó porosidades de 53 – 63 %, el color de los suelos secos varió desde marrón pálido a marrón a diferencia de la muestras húmedas que presentaron colorimetrías marrones grisáceas a marrón rojizo. Por otro lado, en cuanto a las propiedades químicas se obtuvieron pH poco ácidos a ácidos de 6.27 a 5.31, el contenido de macronutrientes presentó una alta concentración de nitrógeno (N) con valores de 0.19 – 0.41 %, fósforo con valores medio-bajos 0.97 a 19.06 ppm, potasio con concentraciones altas-medias de

197.62 a 56.51 ppm, el calcio y magnesio conjuntamente presentaron concentraciones altas Ca= 9.67 a 25.39 meq/100g y Mg= 7.30 a 8.90 meq/100g.

En cuanto a los micronutrientes las concentraciones variaron de bajo a alto, hierro Fe= 338.41 a 63.27 ppm, cobre Cu= 1.52 a 3.97 ppm, manganeso Mn= 18.65 a 84.01 ppm y zinc Zn= 3.18 a 8.03 ppm. La conductividad eléctrica representó suelo no salinos con valores bajos de (83 – 244 μ s/cm), a su vez, se identificaron altas concentraciones de sodios Na (163.32 a 317.48 ppm). El contenido de materia orgánica señaló rangos medios a bajos con valores de 1.03-5.03 %, por último, se observó en su mayoría una baja concentración de acidez intercambiable 0.2-1.2 meq/100g y aluminio con valores de 0.0 meq/100g.

Se representó mediante mapas el uso y cobertura boscosa en los años 2012 y 2021, se halló para el 2012 una predominancia de áreas de pasto en 3,191 ha (51.4 %) y áreas bosque secundario en 2,085 ha con 33.3% del territorio. Mientras que, para el 2021 se notó una reducción a 2,761.6 ha 44.5 % del área de pasto que dio paso a un incremento del área de bosque secundario en 2,696.7 ha lo que representó el 43.4 % de la superficie. Del mismo modo, se observó una disminución del bosque maduro a 599.1 ha lo que evidenció el 9.6 % del territorio total. Entre ambos años se observó una dinámica de reducción del 7 % del pasto y un incremento del 10 % del bosque secundario. Mediante la comparativa de cambio de uso de suelo entre 2012 y 2021, se evaluó que 4,125 ha (66.5 %) no presentaron cambio alguno, un 16.4 % pasó de ser área pasto a área de bosque secundario, parte del área bosque secundario cambió a área de pasto un 7.2 %, el área de bosque maduro un 0.9 % y rastrojo 1.0 %. Parte del área de bosque maduro cambió a área de pasto un 2.3 % mientras que, un 2.1 % pasó a áreas de bosque

secundario y rastrojo un 0.5 %, mientras que apenas un 0.6 % del área de pasto y rastrojo pasó a ser área de bosque maduro y secundario. Se enfatizó que un 33.5 % del área total sí estuvo sujeta a cambios durante el período de evaluación.

6. RECOMENDACIONES

1. Se hace necesario realizar nuevos estudios de esta índole no solamente en la provincia de Colón sino también, en otros puntos de interés a nivel nacional, desde un punto de vista agrícola el conocer la propiedades físicas y químicas de los suelos les permite a los pequeños, medianos y grandes productores conocer qué tipo de necesidad y manejo requiere el suelo para una óptima producción.

2. Resulta de vital importancia tomar en cuenta la capacidad agrológica de los suelos en los planes de ordenamiento territorial nacionales para evitar problemas de usos de suelos que no van acorde con su uso potencial lo que podría originar problemas de degradación ambiental y la ocurrencia de desastres como inundaciones y deslizamientos que pone en riesgo la seguridad de la sociedad.

3. Las organizaciones ambientales competentes deben enfatizar en el análisis y evaluación del cambio de uso del suelo en diferentes regiones del país para identificar el grado y tipo de impacto provocado en los recursos naturales involucrados, llámese suelo, flora y fauna silvestre, agua para la satisfacción de la demanda poblacional.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, C. (2006). El suelo agrícola, un ser vivo. Narraciones de la ciencia.
<https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/713/819>
2. Andrades, M., Aransay, J., Diago, M., Lana-Renault, N. Llorente, J., Ruiz, P., y Sáenz de Cabezón, E. (2020). *Enseñanza de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en estudios de grado y posgrado en la Universidad de La Rioja*. Editor Universidad de La Rioja.
<https://investigacion.unirioja.es/documentos/5e58ffa72999526fa46a8517>
3. Arcia, I. y Klein, A. (2017). Caracterización de la producción de plátanos en la comunidad de Achiote, Colón. Asociación Centro de Estudios y Acción Social Panameño (ACEASPA).
https://www.mcgill.ca/pfss/files/pfss/caracterizacion_de_la_produccion_de_platanos_en_la_comunidad_de_achiote_colon.pdf
4. Arias, A. (2001). *Suelos Tropicales*. Primera edición. Editorial Euned. Costa Rica.
5. Arya, R. y Khan, K. (2020). *Fundamentals of soil science*. Editor Scientific Publishers.
https://www.google.com.pa/books/edition/Fundamentals_of_Soil_Science/Esf3DwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
6. Bienes, R. (2009). *El perfil del suelo: formación y clasificación*. Departamento de Investigación Agroambiental. IMIDRA.
https://www.researchgate.net/profile/Ramon-Bienes/publication/235890059_El_perfil_del_suelo_formacion_y_clasificacion/links/00b4951691c61dda6d000000/EI-perfil-del-suelo-formacion-y-clasificacion.pdf

7. Bocco, G., Mendoza, M., y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, número 44, (pp. 18-38).
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n44/n44a3.pdf>
8. Bosch, M., CAOSA, J., Cabria, F. y Aparicio, V. (2012). Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Revista Ciencia del suelo*, 30(2).
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185020672012000200003&script=sci_arttext&tlng=pt
9. Caicedo, L., Méndez, F., Gutiérrez, E. y Flores, J. (2021). Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. *Pädi* 9(7).
<https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>
10. Calvano, F. y Fontalvo, M. (2014). El uso del suelo ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas?. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 5(2) (pp.213-231). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517751549002>
11. Casas, R. (2012). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. Ediciones Paraninfo. España.
[https://www.google.com.pa/books/edition/El suelo de cultivo y las condicione s_cl/h8_qVzloJ00C?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pa/books/edition/El_suelo_de_cultivo_y_las_condicione_s_cl/h8_qVzloJ00C?hl=es-419&gbpv=0)
12. Castillo, J. y Olmeda, M. (1998). *El sector agroalimentario y el desarrollo regional*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
[https://www.google.com.pa/books/edition/El sector agroalimentario y el desarr oll/9OhZd9fAYX4C?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pa/books/edition/El_sector_agroalimentario_y_el_desarr oll/9OhZd9fAYX4C?hl=es-419&gbpv=0)

- 13.** CATIE. (2002). Caracterización Suelos (Fertilidad). Escuela Politécnica Superior de Huesca. España.
https://www.google.com.pa/books/edition/CARACTERIZACION_SUELOS_Fertilidad/fpcOAQAAIAAJ?hl=es-419&gbpv=0
- 14.** Choque-Conde, E., Mercado, H. y Choque-Conde, P., (2023). Mapa Textural de Zonas Productoras de Caña de Azúcar de Departamento de Santa Cruz, Bolivia. Terra Latinoamericana. Número 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1701>
- 15.** Cid, G., López, T., Herrera, J. y González, F. (2021). Variación de la Densidad Aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubano. Revista Agrícola. Número 2. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586266250001>
- 16.** Conesa, F. (2009). *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental*. Cuarta edición. Ediciones Mundi-Prensa. https://www.google.com.pa/books/edition/Gu%C3%ADa_metodol%C3%B3gica_para_la_evaluaci%C3%B3n/wa4SAQAAQBAJ?hl=es&gbpv=1
- 17.** Coral, D., Lozano, M. y Moreno, J. (2011). Prácticas culturales y manejo de suelo. Convenio SENA. <https://sac.org.co/wp-content/uploads/2013/05/Cartilla-Suelos.pdf>
- 18.** Corpoica. (1996). Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. Colombia.
- 19.** Cremona, M. y Enriquez, A. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. Presencia 73 (pp.5-8). <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/209253>

20. Cuadrado, S. y Lorenzo, L. (1980). Estudio del suelo, temas de divulgación. Salamanca.
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/23336/1/TEMASMONOGRAFICOS1.pdf>
21. Da Silva, C., Cardozo, O., Odriozola, J. y Bondar, C. (2013). Uso del suelo: Distribución, análisis y clasificación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG)*, número 5, (pp.142-152).
<https://core.ac.uk/download/pdf/80361211.pdf>
22. De la Rosa, D. (2008). Evaluación Agroecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible. Ediciones Mundi-Prensa. España.
https://www.google.com.pa/books/edition/Evaluaci%C3%B3n_agro_ecol%C3%B3gica_de_suelos/WZ4SAQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
23. De Los Ángeles, M., Monterubbianesi, M., Studdert, G. y Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Revista Ciencia del suelo*, 32(2).
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185020672014000200003&script=sci_arttext&tlng=pt
24. Domínguez, J., Román, A., Prieto, F. y Acevedo, O. (2011). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para la evaluación de color en suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Número 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342012000100010&script=sci_arttext

25. Domínguez, J., Román, A., Prieto, F., & Acevedo, O. (2011). Evaluación de color en suelos del Cerro de Denganthza, municipio de Francisco I. Madero, Hidalgo. *Revista Acta Universitaria*, 21(4).
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41620852012>
26. EcuRed. (s.f.) Agua capilar. https://www.ecured.cu/Agua_capilar
27. Erazo, M. y Cárdenas, R. (2013). *Ecología: Impacto de la problemática ambiental actual sobre la salud y el ambiente*. Primera edición. Editorial Ecoe.
https://www.google.com.pa/books/edition/Ecolog%C3%ADa/KZD_AQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
28. Esri. (s.f.). Capas. En Diccionario SIG. Recuperado el 22 de junio de 2025, de <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/layer>
29. Esri. (s.f.). Cómo se representan las entidades en un raster. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/how-features-are-represented-in-a-raster.htm>
30. FAO. (2008). Base referencial mundial del recurso suelo. ISBN: 978-92-5-305511-1. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/afecdf0d-08a9-4754-8ebd-a8070aa71aea/content>
31. Farnum, F. y Murillo, V. (2019). Análisis multitemporal (1970-2017) del uso del suelo en cinco comunidades ubicadas a lo largo de la carretera Boyd Roosevelt, Panamá. *Revista Tecnociencia*, 21(2) (pp. 107-124).
<https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/article/view/576/487>

32. Fassbender, H. y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Editor IICA.
https://www.google.com.pa/books/edition/Química_de_suelos_con_énfasis_en_suelo/SqIGvAwjApEC?hl=es-419&gbpv=0
33. Fierro, S. (s.f.). *La textura del suelo*. <https://rea.ceibal.edu.uy/elp/el-suelo-es-el-limite-conocelo-cuidalo/textura.html>
34. Fuentes, R. (2007). *Agrosistemas sostenibles y ecológicos*. Editor Universidade de Santiago de Compostela.
https://www.google.com.pa/books/edition/Agrosistemas_sostenibles_y_ecol%C3%B3gicos/oHtVPwP1vpsC?hl=es-419&gbpv=0
35. Garavito, F. (1974). *Propiedades químicas de los suelos. Volumen X(11)*. “Instituto Geográfico Agustín Codazzi” Colombia.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18436>
36. Geology science. (2024). *Erosión, meteorización y formación de suelo: el ciclo natural de la descomposición de las rocas y la creación de suelo*.
<https://i0.wp.com/geologyscience.com/wp-content/uploads/2024/10/Soil-Formation-1200x528-jpg.webp?resize=640%2C282&ssl=1>
37. Gliessman, S. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Editor CATIE.
https://www.google.com.pa/books/edition/Agroecolog%C3%ADa_procesos_ecol%C3%B3gicos_en_agricultura/rnqan8BOVNAC?hl=es-419&gbpv=0

38. Gómez, I. (2005). Análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en la evaluación química de la fertilidad en el cultivo de la papa. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural . <http://hdl.handle.net/20.500.12324/17455>
39. Guarnaschelli, G. (2009). *Árboles*. Primera edición. <https://www.google.com.pa/books/edition/%C3%81rboles/Kqv8wRAeeTAC?hl=es-419&gbpv=0>
40. Hodgson, J. (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. Editorial Reverté. [https://www.google.com.pa/books/edition/Muestreo y descripci%C3%B3n de suelos/Gge-HNCUwXYC?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pa/books/edition/Muestreo_y_descripci%C3%B3n_de_suelos/Gge-HNCUwXYC?hl=es-419&gbpv=0)
41. Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo*. Editorial Reverté. ISBN: 84-291-1027-5. España.
42. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (IICA). (1995). Programa Nacional de Desarrollo Rural. [https://www.google.com.pa/books/edition/Programa_Nacional_de_Development Rural_Pr/LgqAAAAYAAJ?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pa/books/edition/Programa_Nacional_de_Development_Rural_Pr/LgqAAAAYAAJ?hl=es-419&gbpv=0)
43. IICA-Brasil. (1995). Proyecto regional: regeneración y ,anejo sostenible de los suelos degradados de las sabanas, una estrategia para la preservación del medio ambiente. Editor IICA Biblioteca de Venezuela. [https://www.google.com.pa/books/edition/Proyecto_Regional_regeneraci%C3%B3n y manejo/Xr4qAAAAYAAJ?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pa/books/edition/Proyecto_Regional_regeneraci%C3%B3n_y_manejo/Xr4qAAAAYAAJ?hl=es-419&gbpv=1)
44. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER. (2021). Primer Atlas Nacional de Suelos de la Republica de Nicaragua. <https://www.ineter.gob.ni/mapa/pub/atlassuelo/1erAtlasNacionaldeSuelos.pdf>

45. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2023). *Superficie, población y densidad poblacional según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: Censos de 2000, 2010 y 2023.*
<https://www.inec.gob.pa/archivos/P053342420231213140620Cuadro%2004.pdf>
46. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2023). *Superficie de cultivos anuales o temporales, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: Año agrícola 2022/24.*
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=1331&ID_CATEGORIA=21&ID_SUBCATEGORIA=78
47. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), Censo Agropecuario. (2024). *Superficie de las explotaciones agropecuarias en la república, por aprovechamiento de la tierra, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: VIII Censo Nacional Agropecuario 2024.*
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=1330&ID_CATEGORIA=21&ID_SUBCATEGORIA=78
48. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), Censo Agropecuario. (2024). *Productores agropecuarios y superficie en la república, por actividad principal, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento: VIII Censo Nacional Agropecuario 2024.*
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=1329&ID_CATEGORIA=21&ID_SUBCATEGORIA=78

49. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2011). *Superficie de explotaciones agropecuarias por aprovechamiento de la tierra, según provincia, comarca indígena, distrito y corregimiento*.
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=470&ID_CATEGORIA=15&ID_SUBCATEGORIA=60
50. Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2011). *Productores agropecuarios y superficie en la República, por actividad principal, según provincia, comarca indígena y tamaño de explotación*.
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=443&ID_CATEGORIA=15&ID_SUBCATEGORIA=60
51. Jenny, H. (1941). Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology.
https://books.google.com.pa/books?id=p94TjEnzCTcC&dq=Factors+of+Soil+Formation:+A+System+of+Quantitative+Pedology&printsec=frontcover&source=bn&hl=en&ei=XfXZS_udG5OINtr74Ug&sa=X&oi=book_result&ct=result&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
52. Jiménez, L., Mezquida, E., Capa, M. y Rubio, A. (2007). Cambio en las propiedades del suelo por transformación de áreas boscosas en pastizales en Zamora-Chinchipe (Ecuador). *Revista Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, volumen 22 (pp. 65-70). <https://oa.upm.es/48545/>
53. López, F., Duval, M., Martínez, J. y Galantini, J. (2016). Porosidad de Ustoles bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencias del Suelo*, Argentina.
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/30458/CONICET_Digital_Nro.27_6410a3-4789-4117-a993-2e3e3c89588a_B.pdf?sequence=11&isAllowed=y

- 54.** Kanninen, M., Murdiyarso, D., Seymour, F., Angelsen, A., Wunder, S. y German, L. (2008). *¿Crecen los árboles sobre el dinero?*. Editor Center for International Forestry Research.
https://www.google.com.pa/books/edition/Crecen_los_%C3%A1rboles_sobre_el_dinero_impl/uXlleBjrJLAC?hl=es-419&gbpv=0
- 55.** Kumar, r., Singh, V y Upadhyay, A. (2017). *Planning and Evaluation of Irrigation Projects*. Academic Press.
https://www.google.com.pa/books/edition/Planning_and_Evaluation_of_Irrigation_Pr/ddq1DQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=
- 56.** Los Sistemas de Información Geográfica. (2006). *Revista Geoenseñanza*, 11(1), (pp. 107-116). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36012424010>
- 57.** Lu, Y., Wang, X., Wang, M., Zhu, B., Zheng, M., Li, S. y Song, K. (2023). Soil color mapping based on Munsell system in the northeast of China. *Geoderma*, 439,116669. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116669>
- 58.** MAG. (1991). Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P01-0684.pdf>
- 59.** Marinas, M. (2022). *Preparación del medio de cultivo*. Editorial Tutor Formación. España.
https://www.google.com.pa/books/edition/Preparaci%C3%B3n_del_medio_de_cultivo_UF0019/pi5dEAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0

- 60.** Medina, J., Volke, V., Galvis, A., Santiago, M. y Cortés, F. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Revista Universidad y Ciencia*, 22(2), (pp. 175-189).
<https://www.redalyc.org/pdf/154/15422208.pdf>
- 61.** MIRENEM. (1995). Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. Segunda edición.
- 62.** Miragem, S., Pietra, E., Fuentes, N., Nadal, F., Porteiro, J., Sánchez, B. y Platero, R. (1982). Guía para la elaboración de proyectos de desarrollo agropecuario. Editor IICA.
https://www.google.com.pa/books/edition/Gu%C3%ADa_para_la_elaboraci%C3%B3n_de_proyectos/UG2eXO5KXbMC?hl=es-419&qbpv=0
- 63.** Molina, Y. (2019). La reforestación como estrategia ambiental para la conservación de ríos y quebradas. *Revista Científica*, 4(13) (pp.182-199).
<https://www.redalyc.org/journal/5636/563659492010/html/>
- 64.** Montero, A. y Viales, R. (2015). La teoría del cambio en el paisaje a partir del cambio del uso de la tierra y la cobertura del suelo (enfoque LUCC). Su utilidad para la historia ambiental. *Revista Reflexiones* 94(2) (pp.25-33).
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72946471002>
- 65.** Murillo, J. (s.f.). Propiedades físicas del suelo y relación con los sistemas de labranza.
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/21343/42503_46556.pdf?s

66. Moreno, A. y Renner, I. (2006). Gestión Integral de Cuencas: La experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas. Primera edición.
https://www.google.com.pa/books/edition/Gesti%C3%B3n_Integral_de_Cuencas/jWJzjucuibwC?hl=es-419&gbpv=0
67. Muñoz, D., López, F., Hernández, M., y López J. (2009). Impacto de la pérdida de vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. Revista Terra Latinoamericana. Número 3. México.
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57313037008.pdf>
68. Navarro G. y Navarro, S. (2013). *Química agrícola: Química del suelo y los nutrientes esenciales para las plantas*. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa. España.
69. Núñez, J. (1998). *Fundamentos de Edafología*. Segunda edición, editorial Universidad Estatal a distancia. San José, Costa Rica. ISBN: 9977-64-148-x.
https://www.google.com.pa/books/edition/Fundamentos_de_Edafolog%C3%ADa/dpAcHU7xxoC?hl=es-419&gbpv=1
70. Núñez, M., Serrano, J., Jimenez, A., Orozco, M., García, J., Gómez, R., Ontiveros, H. y Aguirre, J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. Revista Bio Ciencias, 1(3) (pp. 27 – 35).
<https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/17/15>

71. Núñez, V. (2012). Los Sistemas de Información Geográfica. Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo IRNED.
<https://bibliotecavirtualaserena.wordpress.com/wpcontent/uploads/2017/11/cartilla-tec3b3rica.pdf>
72. Oliveira, J., Afif, E. y Mayor, M. (2006). Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Ediciones de la Universidad de Oviedo. España.
73. Oliva Escobar, D. P. (2009). Determinación de la acidez intercambiable ($Al^{+3} + H^{+}$) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua. [Tesis de Licenciatura, Zamorano, Honduras].
<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/3f679f2b-7df3-42d4-93bacfd0a3619e7d/content>
74. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (s.f.), *Textura del suelo: diagrama triangular de las clases texturales del suelo según el tamaño de las partículas, de acuerdo con el USDA*.
https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
75. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.). Portal de Suelos de la FAO. Propiedades Químicas.
<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>

76. Ortega, S., García, A., Ruíz, J. y Vargas, J. (2010). *Deforestación Evitada. Una Guía REDD + Colombia*.
https://www.google.com.pa/books/edition/Deforestaci%C3%B3n_Evitada_Una_Gu%C3%ADa_REDD_+/8zio9Z49VMwC?hl=es-419&gbpv=0
77. Osorio, M., Haro, J, Carillo, W. & Negrete, J. (2022). *Suelos: Caracterización e importancia*. Editorial Puerto Madero. ISBN: 978-987-88-5025-2.
<https://puertomaderoeditorial.com.ar/index.php/pmea/catalog/view/7/64/81>
78. Portal Frutícola. (27 de febrero de 2019). *Cómo usar la tabla de color Munsell en la descripción y clasificación de los suelos*.
<https://www.portalfruticola.com/noticias/2019/02/27/como-usar-la-tabla-de-color-munsell-en-la-descripcion-y-clasificacion-de-los-suelos/>
79. Prado, B. Abbruzzini, T., Durán, J. y Lopera, A. (2024). El valor fundamental de los suelos para la vida en la Tierra. *Revista Nuestra Tierra*, número 42. Universidad Autónoma de México.
[https://erno.geologia.unam.mx/uploads/nuestra-tierra/archivos/42/Revista Nuestra Tierra 42.pdf](https://erno.geologia.unam.mx/uploads/nuestra-tierra/archivos/42/Revista_Nuestra_Tierra_42.pdf)
80. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT). (s.f.). *Vegetación y uso del suelo*.
https://paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/img/cap2.pdf
81. Quimicasa (21 de noviembre de 2018). *El equilibrio marca la diferencia parte 2: el pH del suelo*. <https://quimcasa.blog/2018/11/21/el-equilibrio-marca-la-diferencia-parte-2/>

82. Quimicasa. (31 de enero de 2019). *El equilibrio marca la diferencia parte 4: La estructura del suelo*. <https://quimcasa.blog/2019/01/31/el-equilibrio-marca-la-diferencia-parte-4-continuacion/>
83. QuimiNet. (7 de febrero de 2006). *El análisis de suelo*. <https://pt.marketizer.com/articulos/el-analisis-de-suelos-5670.htm>
84. Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos*. Primera edición. <https://fermojica.com/sca/documentos/Propiedades.pdf>
85. Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. E-ISBN 978-925-307845-5. <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>
86. Rucks, L., García, F., Kaplán, A. y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo- Uruguay. Montevideo- Uruguay. <https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdfhttps://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>
87. Sadeghian, S. (2010). *La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/11113/3/libroMO.pdf>
88. Salazar, J. (2018). *Aprovechamiento de recursos y manejo del suelo ecológico*. Editorial IC. España. https://www.google.com.pa/books/edition/Aprovechamiento_de_recursos_y_manejo_de/y1EpEAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
89. Sandoval, C. y Cantú, I. (2021). Análisis geomático del cambio de uso del suelo en la subcuenca río Copalita, Oaxaca. *Revista Ecosistemas y recursos agropecuarios*. Número 11. <https://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/2915>

90. Sandoval, C., Cantú, I., González, H., Yáñez, M., Marmolejo, J. y Gómez, M. (2021). Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(68). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982>
91. Smithsonian Tropical Institute. (2024). Stri GIS Portal River and Stream Finder 2024. <https://stridatasi.opendata.arcgis.com/apps/ae8a8474db304b74bebbd48369a916b4/explore>
92. Solano, M. (2019). Agrological Capacity of Panama. Smithsonian Institution. https://stridatasi.opendata.arcgis.com/datasets/b3c1d9bc65c24065a59e6f7a437b293f_0/explore?location=8.492218%2C-80.090823%2C5.70
93. Solano, M. (2025). Geology of the Republic of Panama. Smithsonian Institution. https://stridatasi.opendata.arcgis.com/datasets/09021b61cd7946e78fcf16ed53613e60_13/explore?location=8.352208%2C-80.103084%2C6.50
94. Thompson, L. y Troeh F. (1981). *Los suelos y su fertilidad*. Editor Reverte.
95. Thompson, L. y Troeh, F. (2021). *Los suelos y su fertilidad*. Cuarta edición. Editor Reverte. [https://www.google.com.pa/books/edition/Los suelos y su fertilidad/VpIUAAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.pa/books/edition/Los_suelos_y_su_fertilidad/VpIUAAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0)
96. Valverde, J. (1985). *Riego y drenaje*. Secretaria de Educación Pública de México. Impreso en Costa Rica.
97. Vazquez, P., Zulaica, L. y Somoza, A. (2019). Tasas de cambio de uso del suelo y agriculturización en el partido de Tandil. *Revista Geoambiente* . <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i34.58711>

98. Velasco, J., Cabrera, M., De Hoyos, C., Ledesma, J., Nieto, J., Revuelta, J., Romero, T., Salamanca, C., y Torres, M. (2009). Ciencias de la Tierra y Medioambientales. Editorial Editex. España.
99. Velázquez de Castro, F., Del Carmen, M. (1998). *Temas de educación ambiental en las ciencias de la vida*. Editorial Narcea. ISBN: 84-277-1240-5.
[https://www.google.com.pa/books/edition/Temas de educaci%C3%B3n ambiental en las cie/eTEKq3LOTNQC?hl=es-419&gbpv=1](https://www.google.com.pa/books/edition/Temas_de_educaci%C3%B3n_ambiental_en_las_cie/eTEKq3LOTNQC?hl=es-419&gbpv=1)
100. Velázquez, R., Holguín, W., Loor, I. y Muñoz, I. (2022). Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas de la parroquia El Esfuerzo del cantón Santo Domingo de los Tsáchilas. *Revista Sinapsis*, 2(21).
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9052304.pdf>
101. Velázquez, R., Maldonado, K., Del Valle, W. y Valdés, P. (2020). Integración de saberes en la parroquia Pedro Pablo Gómez del Cantón Jipijapa. *Revista Científica Multidisciplinaria*.
<https://revistas.unesum.edu.ec/index.php/unesumciencias/article/view/200/152>
102. Vila, J. y Varga, D. (2008). Los Sistemas de Información Geográfica. Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica.
http://www.creaf.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/16_Cap%C3%ADtulo15.pdf
103. Villalobos, F. & Fereres, E. (2017). Fitotecnia: Principios de agronomía para una agricultura sostenible. Ediciones Mundi-Prensa. España.
104. Villareal, J. (2000). *Cucunubá: Modelo para un desarrollo sostenible*. Editor: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

https://www.google.com.pa/books/edition/Cucunub%C3%A1/LOpB_Y6eKd4C?hl=es-419&gbpv=0

- 105.** Villarreal, J., Name, B. y García, R. (2013). Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. *Revista Científica, Ciencia Agropecuaria*, (21) <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/184>
- 106.** Vistoso, E. y Martínez, J. (2022). Importancia de la fertilidad del suelo en la producción agropecuaria. Instituto de investigaciones agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/32121df6-118b-489f-b4fa-978ab7e3cd1d/content>
- 107.** Yáñez, M., Cantú, I. y González, H. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Revista Terralatioamericana*, 36(4) (pp. 369-379). <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>

8. ANEXOS

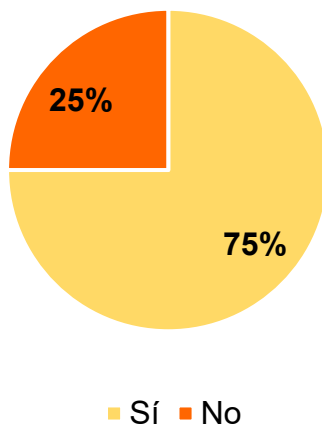


Anexos 1 y 2: Inicio de la comunidad de Achiote en la Costa Abajo provincia de Colón y Centro de visitantes El Tucán, zona de muestreo número 4. Fuente: Panama – Birds & Wildlife (s.f.)



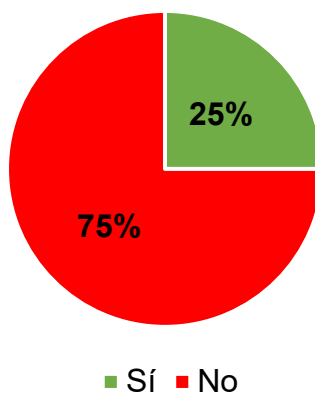
Anexos 3 y 4: Sendero El Higuerón dentro del Centro el Tucán y presencia de actividad silvopastoril dentro de la comunidad de Achiote.

¿Ha notado usted cambios en el uso del suelo dentro de la comunidad de Achiote en los últimos años?



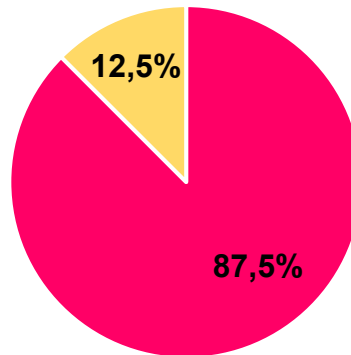
Anexo 5: Encuesta acerca de la percepción de los moradores de Achiote. Fuente: Elaboración propia.

¿Considera que el bosque a sido conservado o cuidado dentro de Achiote en los últimos años?



Anexo 6: Encuesta de consideración sobre la conservación del bosque dentro de la comunidad de Achiote. Fuente: Elaboración propia.

¿Dentro de su terreno se realiza alguna de las siguientes actividades?

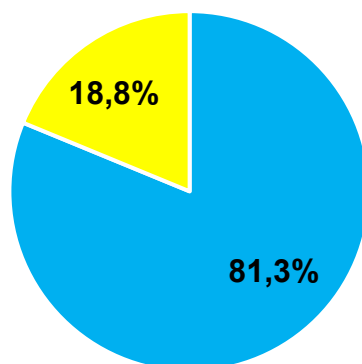


- Agrícola (tiene usted plantaciones de cultivos en gran parte de su terreno)
- Ganadería (dentro de su terreno tiene usted un hato)

Anexo 7: Actividades del sector agropecuario desarrolladas en la comunidad de Achiote.

Fuente: Elaboración propia.

De las siguientes situaciones ¿Cuáles se dan con mayor frecuencia dentro de la comunidad de Achiote?



- Inundaciones
- Deslizamientos

Anexo 8: Frecuencia de riesgos ambientales ocurridos en la comunidad de Achiote.

Fuente: Elaboración propia.

SUPERFICIE DE CULTIVOS PRESENTES EN LA COMUNIDAD DE ACHIOTE - 2023/24

Cultivo	Número de explotaciones	Superficie sembrada (ha)
Arroz	27	17.88
Maíz	32	20.51
Frijol	4	0.37
Guandú	5	0.11
Yuca	79	2.36
Ñame	28	0.79
Otoe	41	5.38
Café	30	6.69
Banano	22	0.42
Plátano	185	13.95
Papaya	20	0.04
Naranja	33	1.04
Cacao	7	0.04
Achiote	5	0.09
Aguacate	40	1.61
Limón	22	0.23
Mango	16	0.67
Guanábana	20	0.50
Nance	11	0.36
Ñampí	22	0.68
Caña de azúcar	8	0.04
Tomate perita	1	0.00
Pimiento dulce	1	0.00
Culantro	3	0.01
Ají picante	1	0.00
Ají dulce	29	0.01
Pepino	1	0.00
Zapallo	2	0.00
Jengibre	3	0.00

Anexo 9: Cultivos presentes en Achiote y superficie sembrada. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá (2023).

**SUPERFICIE DE EXPLOTACIONES AGROPECUARIAS, POR APROVECHAMIENTO
DE LA TIERRA EN EL CORREGIMIENTO DE ACHIOTE AÑOS 2011 VS 2024**

Explotaciones agropecuarias y aprovechamiento de la tierra	Años		Cambio de 2011 a 2024
	2011 (ha)	2024 (ha)	Cambio (ha)
Cultivos anuales	96.16	111.07	14.91
Tierras en rastrojo	-	23.81	23.81
Tierras en descanso	698.05	3.48	694.57
Cultivos permanentes	232.01	142.88	89.13
Pastos naturales	57.22	1,227.00	1,169.78
Pastos mejorados	362.50	259.39	3.11
Pastos de corte y banco proteico	4.00	-	4.00
Bosque naturales y montes	153.31	193.34	40.03
Otras tierras (matorrales, ciénagas, corrales, galeras y edificios)	54.94	65.95	11.01
Total de superficies	3,571.14	2,126.92	1,444.22
Total de explotaciones agropecuarias	126	245	

Anexo 10: Tenencia y aprovechamiento de la Tierra 2011 vs 2024. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá. Censo Agropecuario (2024).

**PRODUCTORES AGROPECUARIOS Y SUPERFICIE, POR ACTIVIDAD PRINCIPAL
EN EL CORREGIMIENTO DE ACHIOTE AÑOS 2011 VS 2024**

Actividad principal	Años				Cambio 2011 → 2024	
	2011		2024			
	No. productores	Superficie (ha)	No. productores	Superficie (ha)	No. productores	Superficie (ha)
Agrícola	63	1,006.85	89	168.32	+26	838.53
Pecuaria	7	379.00	52	329.32	+45	49.68
Silvícola	-	-	-	-	-	-
Pesca	-	-	-	-	-	-
Acuícola	-	-	-	-	-	-
No agropecuaria	31	190.46	0	-	-31	-

Anexo 11: Cantidad de productores por actividad principal en Achiote 2011 vs 2024.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá. Censo Agropecuario (2024).