

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



TESIS

**DETERMINACIÓN DEL CARBONO EN EL SUELO DEL BOSQUE DEL
CASERÍO LA PALMA, CHADÍN, CHOTA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO FORESTAL**

**PRESENTADA POR LA BACHILLER:
ELÍSIDA ANGÉLICA BURGA DÍAZ**

**ASESOR:
ING. LUIS DÁVILA ESTELA**

CAJAMARCA – PERÚ

2019



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Cajamarca, a los 18 días del mes de noviembre del Año dos mil diecinueve, se reunieron en el ambiente 2C – 211 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los integrantes del Jurado designados por Consejo de Facultad de Ciencias Agrarias, según Resolución de Consejo de Facultad N° 415-2019-FCA-UNC, fecha 28 de agosto del 2019, con el objetivo de evaluar la sustentación de la Tesis titulada: “**DETERMINACIÓN DEL CARBONO EN EL SUELO DEL BOSQUE DEL CASERÍO LA PALMA, CHADÍN, CHOTA**”, la misma que fue sustentada por la Bach. en Ciencias Forestales **ELÍSIDA ANGÉLICA BURGA DÍAZ**, para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las 16 horas y 30 minutos y de acuerdo a lo estipulado en el Reglamento respectivo, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto. Después de la exposición de la Tesis, formulación de preguntas y de la deliberación del Jurado; el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad con el calificativo de Quince (15). Por lo tanto, la graduando queda expedita para que se le expida el **Título Profesional** correspondiente.

A las 18 horas y 30 minutos, el Presidente del Jurado dio por concluido el acto.

Cajamarca, 18 de noviembre del 2019.

.....
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
PRESIDENTE

.....
Ing. Honorio Sangay Martos
SECRETARIO

.....
Ing. M. Sc. Walter Roncal Briones
VOCAL

.....
Ing. Luis Dávila Estela
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y cuidarme siempre, ya que él fue quien inspiro mi espíritu para la realización de este estudio, por darme salud y bendición para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

A mis padres Rafael e Hilda, quienes me han apoyado en todo momento y con sus sabios consejos y palabras de aliento me han ayudado a crecer como persona y a luchar por lo que quiero, gracias por enseñarme valores que me han llevado a alcanzar una gran meta. Los quiero mucho. Gracias madre y padre.

A mis hermanos Carlos, Yanet y Ronald, gracias por su apoyo, cariño y por estar en los momentos más importantes de mi vida. Este logro también es de ustedes.

A mis abuelos, Florencio y Ormesinda, quienes fueron las personas después de mis padres que más se preocupaban por mí. Gracias por sus enseñanzas y cariño.

A mi tía Maribel, por apoyarme, aconsejarme y darme aliento en los momentos más difíciles. Gracias tía por todo.

A mis amigos por permitirme aprender más de la vida a su lado. Esto es posible gracias a ustedes.

A mi asesor, por el tiempo, dedicación y paciencia en la elaboración de este documento.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por cuidarme y ayudarme a culminar este trabajo.

A mis padres, por su apoyo incondicional y por ser un gran ejemplo en mi vida.

A mi asesor el Ing. Luis Dávila Estela por apoyarme en todo momento, por sus sabios consejos e instrucciones, por sus valiosos aportes en la elaboración de este trabajo.

Al M. Sc. Atilio Cadenillas Martínez, por apoyarme y ayudarme a resolver mis dudas.

Al José Carlos Requelme Vigo, quien fue parte del equipo de campo y quien ha estado en todo momento acompañándome.

A la familia Bustamante Mires, por acogernos en su hogar y ayudarnos desinteresadamente en la recolección de datos de campo. En especial al sr. Reymundo Bustamante Quintana por acompañarnos y ayudarnos en la recolección de muestras de suelos de los bosques.

Al técnico del Laboratorio de Edafología y Física de Suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca, Juan Miguel Barboza Carrión, por ayudarme en el secado de las muestras de suelo para determinar la densidad aparente.

Al técnico del Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional de Cajamarca, Jhon Yober Campos Herrera, por facilitarme los materiales para la recolección de muestras de suelo de campo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de investigación	2
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Objetivos de la investigación	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis de la investigación	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Bases teóricas.....	5
2.2.1. El Suelo	5
2.2.2. Materia orgánica en el suelo (MOS)	13
2.2.3. El carbono.....	16
2.2.4. Carbono orgánico del suelo (COS).....	17
2.2.5. Carbono en los ecosistemas forestales	18
2.2.6. Mecanismos para un desarrollo limpio (MDL).....	20
2.2.7. REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques)	20
2.2.8. Bonos de carbono.....	21
2.3. Bases metodológicas	21
2.3.1. Método de Walkley y Black (método de oxidación húmeda).....	21
2.3.2. Calcinación o Ignición.....	24
2.3.3. Determinación del contenido de materia orgánica en el suelo con agua oxigenada	26

2.4.	Definición de términos	27
2.4.1.	Bosque nativo	27
2.4.2.	Bosque primario.....	27
2.4.3.	Bosque secundario	28
2.4.4.	Mineralización.....	28
2.4.5.	Humificación	28
2.4.6.	Combustión.....	28
2.4.7.	Semi - calicata	28
2.4.8.	Hoyo	28
2.4.9.	Carbono orgánico	28
2.4.10.	Muestra simple (submuestra)	29
2.4.11.	Muestra compuesta	29
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1.	Características del área de estudio	30
3.2.	Materiales y equipos	33
3.2.1.	Materiales y equipos de campo	33
3.2.2.	Materiales y equipos de laboratorio	33
3.2.3.	Materiales y equipos de gabinete	34
3.3.	Metodología.....	34
3.3.1.	Fase de campo	34
3.3.2.	Tipo de diseño experimental.....	40
3.3.3.	Fase de laboratorio.....	41
3.3.4.	Fase de gabinete	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	45
4.1.	Contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque primario hasta los primeros 30 cm de profundidad.....	45
4.2.	Contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque secundario hasta los primeros 30 cm de profundidad.	48
4.3.	Comparación del contenido de carbono orgánico del suelo del bosque primario y secundario	51

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
VI. LITERATURA CITADA	61
VII. ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Densidad aparente según el tipo de suelo.	8
Tabla 2. Densidad aparente según el tipo de suelo.	8
Tabla 3. Densidad aparente en el horizonte A del suelo.	9
Tabla 4. Densidad aparente en los horizontes del suelo.	9
Tabla 5. Relación color y propiedades del suelo.	13
Tabla 6. Interpretación de resultados de materia orgánica (%).	16
Tabla 7. Relación entre materia orgánica y tipo de estructura del suelo. ...	16
Tabla 8. Niveles de carbono orgánico del suelo.	20
Tabla 9. Ubicación del área de estudio.	30
Tabla 10. Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial 2x3.	40
Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA).....	41
Tabla 12. Color del suelo del bosque primario.	48
Tabla 13. Color del suelo del Bosque secundario.	51
Tabla 14. Carbono orgánico total por tipo de bosque.	52
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de carbono orgánico.....	53
Tabla 16. Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad, para la interacción de los factores bosque por profundidad (B*P), para el porcentaje de carbono orgánico.....	54
Tabla 17. Densidad aparente por tipo de bosque (g cm ⁻³).	56
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente.	56
Tabla 19. Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad, para la profundidad.	57
Tabla 20. Materia orgánica por tipo de bosque.	59
Tabla 21. CO ₂ absorbido promedio por tipo de bosque.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tabla de Munsell para identificar el color del suelo (Domínguez et al. 2012).	10
Figura 2. Matices de la tabla de Munsell; claridad 6 / pureza 6. (https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system).	11
Figura 3. Intensidad y pureza de los colores en la tabla de Munsell.	11
Figura 4. Algunas hojas de la tabla de Munsell (http://edafologia.ugr.es/programas_suelos/practclas/abcsol/comun/munsells.htm).	12
Figura 5. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos agrícolas (Jordán 2006).....	14
Figura 6. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos Forestales (Jordán 2006).	15
Figura 7. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos con lavado intenso (Jordán 2006).	15
Figura 8. Ubicación del área de estudio en el distrito de Chadín.	32
Figura 9. Diseño de la distribución de las parcelas de muestreo. Escala 1:2500.	35
Figura 10. Distribución de las semi - calicatas en las parcelas de 20 x 20. Escala 1:2500.....	36
Figura 11. Georeferenciación y apertura de la semi - calicata.	37
Figura 12. Distribución de las semi - calicatas en la parcela de las cuales se obtuvieron las muestras para determinar el contenido de carbono.	38
Figura 13. Midiendo la profundidad de la semi – calicata.....	38
Figura 14. Recolección de muestras de suelo.....	38
Figura 15. Marca del cilindro en la recolección de muestras de suelo para determinar densidad aparente.....	39
Figura 16. Cilindro con muestra de suelo para determinar densidad aparente.	39
Figura 17. Semi - calicata de la cual se obtuvo las muestras para determinar la densidad aparente y el color del suelo.	39

Figura 18. Depositando la muestra de suelo en la bolsa ziploc.....	40
Figura 19. Pesado del suelo seco para determinar densidad aparente.....	42
Figura 20. Registro de los datos del peso seco del suelo.	42
Figura 21. Muestra de suelo para determinar el color.	43
Figura 22. Determinando el color del suelo con la tabla de Munsell.....	43
Figura 23. Carbono orgánico del suelo por niveles de profundidad en t ha ⁻¹ . 46	
Figura 24. Densidad aparente por niveles de profundidad.	47
Figura 25. Carbono orgánico del suelo por niveles de profundidad en t ha ⁻¹ . 49	
Figura 26. Densidad aparente por niveles de profundidad.	50
Figura 27. Interacción de los niveles de los factores (bosque por profundidad) para el porcentaje de carbono orgánico en el bosque primario y secundario.....	55
Figura 28. Interacción de los niveles de los factores (bosque por profundidad) para la densidad aparente.....	58
Figura 29. Interior del bosque primario.....	85
Figura 30. Mediciones para determinar la pendiente de la parcela.	85
Figura 31. Georeferenciando la semi -calicata con GPS.....	85
Figura 32. Limpiando la hojarasca del suelo.	85
Figura 33. Aperturando la semi - calicata.....	86
Figura 34. Medición de la profundidad de la semi – calicata.	86
Figura 35. Saliendo del bosque Secundario.....	86
Figura 36. Sobre manila con muestra de suelo para determinar densidad aparente.	86
Figura 37. Pesando el suelo seco y anotando los resultados.....	87
Figura 38. Muestras de suelo recogidas de campo.	87
Figura 39. Comparación del color del suelo con las hojas de la tabla de Munsell.	87

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Formato para Georeferenciar las parcelas de muestreo en campo.....	74
Anexo 2. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar el contenido de carbono orgánico.	74
Anexo 3. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar la densidad aparente.....	75
Anexo 4. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar el color del suelo.	76
Anexo 5. Corrección de pendientes horizontales.	77
Anexo 6. Zonas de vida del distrito de Chadín.	78
Anexo 7. Tipos de suelo (según la WRB) del distrito de Chadín.	79
Anexo 8. Georeferenciación de los puntos de muestreo del bosque primario y secundario.	80
Anexo 9. Datos del cálculo de la densidad aparente de ambos bosques.....	81
Anexo 10. Color del suelo del bosque primario y secundario.	82
Anexo 11. Datos del bosque primario.....	83
Anexo 12. Datos del bosque secundario.	83
Anexo 13. Carbono orgánico promedio por profundidad.	84
Anexo 14. Carbono orgánico total por parcela de muestreo.	84
Anexo 15. Densidad aparente promedio por profundidad.	84
Anexo 16. Panel fotográfico	85
Anexo 17. Resultados del Laboratorio de Servicio del INIA sobre carbono orgánico del suelo.	88

RESUMEN

El estudio se realizó en el caserío La Palma, distrito de Chadín, Chota – Cajamarca, con el fin de determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo, para ello se tomaron muestras de suelo de un bosque natural primario y secundario a 3 profundidades de muestreo: 0 – 10 cm, 10 – 20 cm y 20 – 30 cm; las mismas que sirvieron para hallar el carbono orgánico, la densidad aparente y el color del suelo. El método utilizado para determinar el carbono orgánico del suelo fue el de Walkley y Black. En el bosque primario el contenido de carbono orgánico entre los 0 - 10 cm de profundidad fue 37.22 t ha⁻¹, entre los 10 - 20 cm 47.13 t ha⁻¹ y entre los 20 - 30 cm 49.22 t ha⁻¹; en total se encontró 133.57 t ha⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad; en el bosque secundario el contenido de carbono orgánico entre los 0 - 10 cm fue de 39.23 t ha⁻¹, entre los 10 - 20 cm 37.12 t ha⁻¹ y entre los 20 - 30 cm 29.50 t ha⁻¹; en total se encontró 105.86 t ha⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad. El bosque primario es el que almacena mayor contenido de carbono orgánico en los primeros 30 cm de profundidad.

Palabras clave: bosque primario, bosque secundario, carbono orgánico, color del suelo, densidad aparente.

ABSTRACT

The study was carried out in the hamlet La Palma, district of Chadín, Chota - Cajamarca, in order to determine the content of organic carbon in the soil, for this soil samples were taken from a primary and secondary natural forest at 3 depths of sampling: 0 - 10 cm, 10 - 20 cm and 20 - 30 cm; the same ones that were used to find the organic carbon, the apparent density and the color of the soil. The method used to determine the organic carbon in the soil was that of Walkley and Black. In the primary forest the organic carbon content between 0 - 10 cm deep was 37.22 t ha⁻¹, between 10 - 20 cm 47.13 t ha⁻¹ and between 20 - 30 cm 49.22 t ha⁻¹; in total 133.57 t ha⁻¹ was found in the first 30 cm deep; in the secondary forest the organic carbon content between 0 - 10 cm was 39.23 t ha⁻¹, between 10 - 20 cm 37.12 t ha⁻¹ and between 20 - 30 cm 29.50 t ha⁻¹; in total 105.86 t ha⁻¹ was found in the first 30 cm deep. The primary forest is the one that stores the highest organic carbon content in the first 30 cm deep.

Keywords: primary forest, secondary forest, organic carbon, soil color, apparent density.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques son importantes sumideros naturales de carbono del planeta, un recurso ecológico mundial que está en riesgo a causa de las actividades humanas (Fundación Aquae 2011). Casi el 60% del territorio peruano está cubierto de bosques. Al año 2017, la extensión de los bosques fue de 68 577 351 ha. Durante este mismo año, se deforestó 155 914 ha de bosques. En el Perú, la principal fuente de emisión de GEI es la deforestación (51%) (Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático 2017).

La capacidad de fijación y almacenamiento de carbono es reconocido como un servicio que brindan los bosques naturales y plantaciones a nivel global; por ello el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) recomienda utilizar los bosques para mitigar el aumento de la concentración de gases con efecto invernadero. Recientemente se ha dado mayor importancia al vínculo entre cambio climático y pérdida forestal, por ello se ha implementado los proyectos REDD+ (Reducción de las emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación de los bosques) que buscan la gestión sostenible de los bosques y la conservación y mejora de las reservas de carbono (FAO 2003).

El presente trabajo de investigación pretende cuantificar el contenido de carbono orgánico del suelo de un bosque primario y secundario, con la finalidad de conocer la capacidad acumuladora en el suelo de estos ecosistemas en la zona andina del Perú.

Los resultados encontrados en esta investigación permitirán conocer cuánto de carbono se acumula en el suelo de los bosques montanos del caserío La palma, y darán una idea de la capacidad acumuladora que pueden tener estos bosques en la región Cajamarca. También pueden servir para que en un futuro se pueda implementar un proyecto REDD+ en esta zona y así ayudar a las familias a obtener ingresos extras al conservar los bosques.

1.1. Problema de investigación

Aproximadamente 1 417 billones de toneladas de COS (Carbono Orgánico del Suelo) están almacenadas en el primer metro de suelo y alrededor de 2 500 billones de toneladas a dos metros de profundidad. La pérdida global de almacenamiento del COS desde 1850 se estima en alrededor de 66 (\pm 12) billones de toneladas, principalmente debido al cambio en el uso del suelo (FAO 2016). Existe una amplia evidencia de que el incremento del COS tiene impactos positivos sobre la salud del suelo, la resiliencia al cambio climático y las sequías mediante el incremento de la capacidad de retención de agua, la resistencia a las sequías, la erosión y el control de las inundaciones (FAO 2017).

El suelo de los bosques es el que almacena mayor cantidad de carbono en todo el mundo. Hay más carbono orgánico en el suelo que en la vegetación y la atmósfera junto (FAO 2017). Este carbono puede ser liberado a la atmósfera en forma de CO₂ ya sea por incendios forestales, tala, entre otros.

En el Perú existe escasa información del carbono que se almacenan en el suelo forestal, y la información que se puede encontrar es en su mayoría de la región selva. Una de las principales incertidumbres sobre la función de los bosques montanos de niebla en el Perú dentro del ciclo global del carbono proviene de la escasa información sobre la capacidad de estos ecosistemas para acumular carbono. Motivo por el cual es necesario conocer el contenido de carbono que existe en el suelo de los bosques en esta región del Perú.

En la región Cajamarca existen 121 562 ha de bosques montanos (Sánchez 2015), de los cuales se desconoce el contenido de carbono que almacenan en sus suelos.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el contenido de carbono orgánico en el suelo de un bosque primario y secundario en el caserío La Palma, Chadín, Chota?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo del bosque del caserío La Palma, Chadín, Chota.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Cuantificar el contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque primario hasta los primeros 30 cm de profundidad.
- ✓ Cuantificar el contenido de carbono orgánico total en el suelo en el bosque secundario hasta los primeros 30 cm de profundidad.
- ✓ Determinar el bosque con mayor contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo hasta los primeros 30 cm de profundidad.

1.4. Hipótesis de la investigación

El contenido de carbono orgánico en el suelo del bosque primario es mayor que del bosque secundario.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

El estudio realizado por López (2017) sobre estimación de carbono en la necromasa y en el suelo en el Bosque Protector de Aguarongo, provincia del Azuay, Ecuador encontró que el contenido de carbono en dicho bosque es mayor en el suelo con $262,42 \text{ t ha}^{-1}$, y con respecto a la profundidad de muestreo determinó que hay mayor contenido de carbono a los 30 cm con un valor de $121,52 \text{ t C ha}^{-1}$.

Zanabria y Cuellar (2015) realizaron un estudio en cinco sub cuencas adyacentes al valle del Mantaro en la región Junín, con la finalidad de cuantificar la biomasa y carbono almacenado en seis sistemas de uso de tierra. Los valores totales de acumulación de biomasa total en promedio fueron para la plantación de *Pinus radiata* $265,08 \text{ t ha}^{-1}$; bosque de *Polylepis incana* $132,83 \text{ t ha}^{-1}$; plantación de *Eucalyptus globulus* $100,67 \text{ t ha}^{-1}$; bosque de *Alnus acuminata* $81,92 \text{ t ha}^{-1}$. El carbono fijado alcanzó valores de $165,19 \text{ t ha}^{-1}$ a $321,62 \text{ t ha}^{-1}$ en plantaciones de *Pinus radiata*; de $111,97 \text{ t ha}^{-1}$ a $160,41 \text{ t ha}^{-1}$ en bosques de *Polylepis incana*; $102,27 \text{ t ha}^{-1}$ a $147,71 \text{ t ha}^{-1}$ en plantaciones de *Eucalyptus globulus*; $109,65 \text{ t ha}^{-1}$ a $142,95 \text{ t ha}^{-1}$ en los bosques de *Alnus acuminata*.

Según Pan *et al.* (2001), citado por Galicia *et al.* (2015) el carbono de los bosques del mundo ha sido estimado en 861 Gt, de los cuales, 383 Gt se encuentran en el suelo (44%), 363 Gt en la biomasa aérea (42%), 73 Gt en la madera muerta (8%) y 43 Gt se encuentran en el mantillo (5%); de tal manera que aproximadamente la mitad del C de los ecosistemas forestales se encuentra en el piso forestal y en el suelo, este valor varía con el tipo de bioma. También estimaron que los bosques tropicales almacenan el 32% de C en el suelo, mientras que los bosques templados y boreales almacenan en el suelo alrededor del 60% del C.

Orrego y del Valle (2001) realizaron un estudio en Antioquia (Colombia) sobre la estimación del contenido de carbono en bosques primarios y secundarios,

teniendo los siguientes resultados: biomasa aérea total viva 233,49 t ha⁻¹ y 45,82 t ha⁻¹ en bosques primarios y secundarios respectivamente; necromasa total 14,77 t ha⁻¹ y 7,31 t ha⁻¹ en bosques primarios y secundarios respectivamente; biomasa radical 56,38 t ha⁻¹ y 20,48 t ha⁻¹ en los bosques primarios y secundarios respectivamente; y para los 30 cm de suelo se registró 99,24 t ha⁻¹ y 93,60 t ha⁻¹ de carbono orgánico en los bosques primarios y secundarios respectivamente.

Gamarra (2001) hizo un estudio en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad en la comunidad campesina de Hualhuas, Junín; con el fin de estimar el potencial de carbono almacenado en dicha plantación. Teniendo los siguientes resultados: biomasa arriba del suelo 73,03 t C ha⁻¹; biomasa abajo del suelo 21,64 t C ha⁻¹; hojarasca 4,99 t C ha⁻¹ y suelo 37,39 t C ha⁻¹, teniendo un total de 137,05 t C ha⁻¹.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El Suelo

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre que está compuesta por una mezcla de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos; lo que conforma un medio ambiente muy complejo y variable (Instituto Cartográfico y Geográfico de Catalunya 2018).

Según Jiménez y Hernández (s.f.) el suelo es la parte externa de la corteza terrestre, que ha sufrido y sigue sufriendo acciones causadas por agentes atmosféricos y seres vivos, y sirve de soporte a la vegetación. No es un medio inerte y estable, sino que se altera con el paso del tiempo.

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo (FAO 1996).

2.2.1.1. El perfil del suelo

El perfil del suelo es un corte vertical desde la superficie hasta la roca no alterada, en la que se pueden distinguir varios horizontes (El perfil del suelo y sus horizontes, 2015).

Los horizontes del suelo son capas o estratos de suelo aproximadamente paralelos a la superficie del mismo, con propiedades especiales producidas durante la formación del suelo y que lo distinguen de otras capas adyacentes (Scalone, 2015).

De acuerdo a Jordán (2006) los horizontes del suelo son los siguientes:

- ✓ **Horizonte H:** Acumulaciones de materia orgánica sin descomponer, saturados en agua por largos períodos. Es el horizonte de las turbas.
- ✓ **Horizonte O:** Capa de hojarasca sobre la superficie del suelo, frecuente en los bosques.
- ✓ **Horizonte A:** Formado en la superficie, con mayor porcentaje de materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, más o menos negro, pero cuando contiene poca materia orgánica (suelos cultivados) puede ser claro. Estructura migajosa y granular.
- ✓ **Horizonte E:** Horizonte de fuerte lavado. Típicamente situado entre un A y un B. Con menos arcilla y óxidos de Fe y Al que el horizonte A y B. Con menos materia orgánica que el A. Muy arenosos y de colores muy claros. Estructura de muy bajo grado de desarrollo.
- ✓ **Horizonte B:** Horizonte rico en arcilla, óxidos de Fe y Al o de materia orgánica. Con estructura típicamente en bloques angulares, sub angulares o prismática.

- ✓ **Horizonte C:** Material original. Sin desarrollo de estructura edáfica, ni rasgos edáficos. Blando, suelto, se puede cavar con un zapapico. Puede estar meteorizado pero nunca edafizado.
- ✓ **Horizonte R:** Material original. Roca dura, coherente. No se puede cavar

2.2.1.2. Propiedades físicas del suelo

El carbono orgánico mejora las propiedades físicas del suelo. Los suelos con alto contenido de carbono orgánico tienen colores oscuros, este color capta mayor calor que suelos claros. Mejora la estructura, textura, la densidad aparente es baja, la permeabilidad es mayor, el espacio poroso aumenta, el drenaje del suelo es fácil y no hay encharcamiento (Materia orgánica del suelo s.f.).

La densidad aparente

Es la relación existente entre la masa y el volumen de suelo seco (105°C). En este volumen están considerados los sólidos y todo el espacio poroso existente. Es una característica que nos da a conocer las condiciones en las cuales se encuentra el suelo con respecto a la compactación, la porosidad, la disponibilidad de agua, oxígeno, etc. (Ramírez 1997). Los factores que afectan la densidad aparente son principalmente tres: la textura, la estructura y la presencia de materia orgánica. Suelos con texturas arenosas tienden a tener densidades mayores que suelos más finos, al mismo tiempo en suelos bien estructurados los valores son menores (Donoso 1992, citado por Araucaria 2005).

A medida que aumenta la densidad aparente disminuye la porosidad total, viéndose así afectada la disponibilidad de agua, de oxígeno, la penetrabilidad de las raíces y otras características (Duchaufour 1965; citado por Ramírez 1997). Valores de densidad aparente por debajo de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ indican alta condición porosa del suelo (Jordán 2006).

Tabla 1. Densidad aparente según el tipo de suelo.

Tipo de suelo	Densidad aparente (g cm⁻³)
De rocas y minerales	2,65
Arenosos	1,7 – 1,9
Francos	1,0 – 1,3
Ricos en humus	0,8 – 0,9

Fuente: Donoso (1992), citado por Araucaria (2005).

Tabla 2. Densidad aparente según el tipo de suelo.

Tipo de suelo	Densidad aparente (g cm⁻³)
Orgánicos y volcánicos	< 1,0
Arcillosos	1,0 – 1,19
Francos	1,20 – 1.32
Arenosos	> 1,32

Fuente: Gonzáles (2015).

En general, los valores de la densidad aparente tienden a aumentar con la profundidad del suelo debido a la reducción de la actividad biológica desarrollada en el horizonte A (Alvarado y Forsythe 2005).

Tabla 3. Densidad aparente en el horizonte A del suelo.

Horizonte	Descripción	Densidad aparente (g cm ⁻³)
A1	Rico en materia orgánica, por lo que es oscuro.	0,61
A2	Zona de lixiviación, pobre en materia orgánica, arcilla, óxidos de hierro y aluminio que han sido arrastrados al horizonte inferior.	0,97

Fuente: Andrade *et al.* (2013).

Tabla 4. Densidad aparente en los horizontes del suelo.

Horizonte	Descripción	Densidad aparente (g cm ⁻³)
A1	Rico en materia orgánica, por lo que es oscuro.	0.84
A2	Zona de lixiviación, pobre en materia orgánica, arcilla, óxidos de hierro y aluminio que han sido arrastrados al horizonte inferior.	1.00
AB	Combinación del horizonte A y el B.	1.17
B	Se caracteriza por presentar una acumulación de elementos minerales, con distintos grados de transformación en función del desarrollo que tenga el suelo.	1.02

Fuente: Ángeles *et al.* (2010).

El color

Es una de las propiedades que se puede observar a simple vista. Es un indicador del origen geológico, grado de intemperización, estado de reducción y oxidación, contenido de materia orgánica y estado de lixiviación o acumulación de compuestos químicos en el suelo (Espinoza 2015).

Las Tablas de Color Munsell incluyen todos los matices del rango visible del espectro electromagnético, en suelos se utiliza sólo alrededor de la quinta parte del rango total de matices. La Tabla Munsell está compuesta de hojas, representando cada una de ellas un matiz (hue) específico que aparece en la parte superior derecha de dicha página (rojo, amarillo, verde, azul o violeta).

Cada hoja presenta una serie de plaquitas o "chips" diferentes coloreados y sistemáticamente arreglados en la hoja, que representan la claridad (value) y la pureza (chroma). Las divisiones de claridad se presentan en sentido vertical, incrementando su valor (haciéndose más claro) de abajo hacia arriba; las divisiones de pureza se presentan en sentido horizontal, en la parte inferior de la hoja, incrementándose de izquierda a derecha (Domínguez *et al.* 2012).

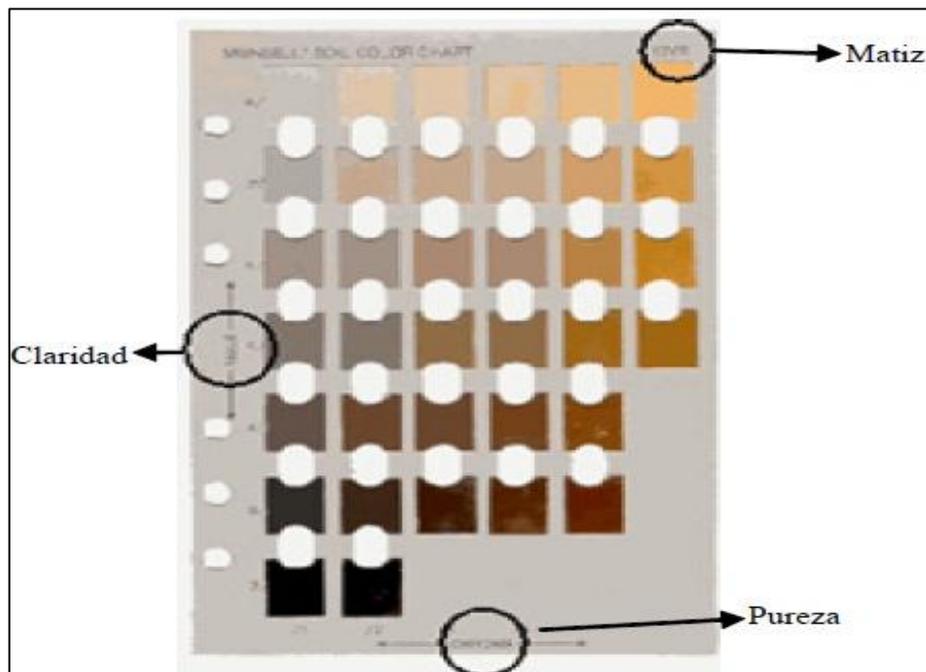


Figura 1. Tabla de Munsell para identificar el color del suelo (Domínguez *et al.* 2012).

Neurtek Instruments señala que existe un orden natural de matices: rojo, amarillo, verde, azul, púrpura. Munsell llamó a estos colores “matices principales”. Además inserto 5 matices intermedios haciendo 10 matices en total y utilizo las iniciales como símbolos para designar 10 sectores de matices, que son los siguientes:

- R:** Red (Rojo)
- YR:** Yellow – Red (Amarillo – Rojo)
- Y:** Yellow (Amarillo)
- GY:** Green - Yellow (Verde – Amarillo)
- G:** Green (Verde)

- BG:** Blue - Green (Azul – Verde)
- B:** Blue (Azul)
- PB:** Purple - Blue (Púrpura – Azul)
- P:** Purple (Púrpura)
- RP:** Red – Purple (Rojo –Púrpura)

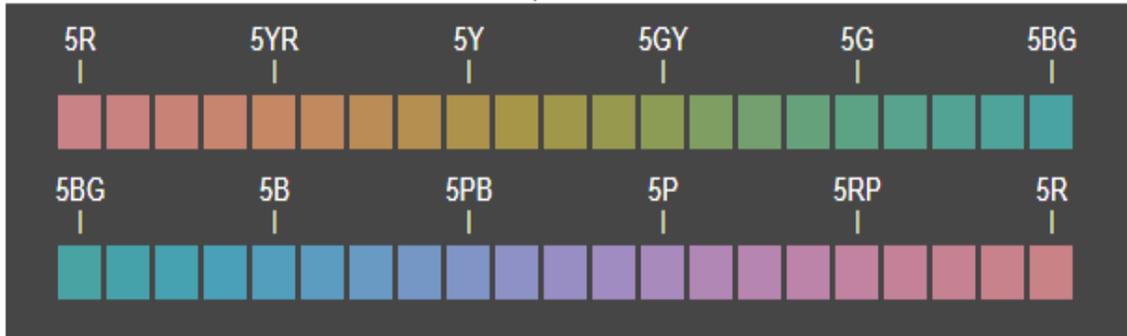


Figura 2. Matices de la tabla de Munsell; claridad 6 / pureza 6. (https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system).

El valor de la intensidad (Value) indica la claridad de un color. La escala oscila de 0 (puro negro) a 10 (puro blanco). El blanco, negro y grises entre ellos se llaman “colores neutros”. La pureza (Chroma) es el grado de salida de un color del color neutro del mismo valor. Los colores de baja pureza son llamados débiles, mientras que los de altos valores son llamados fuertes o vivos (Neurtek Instruments).

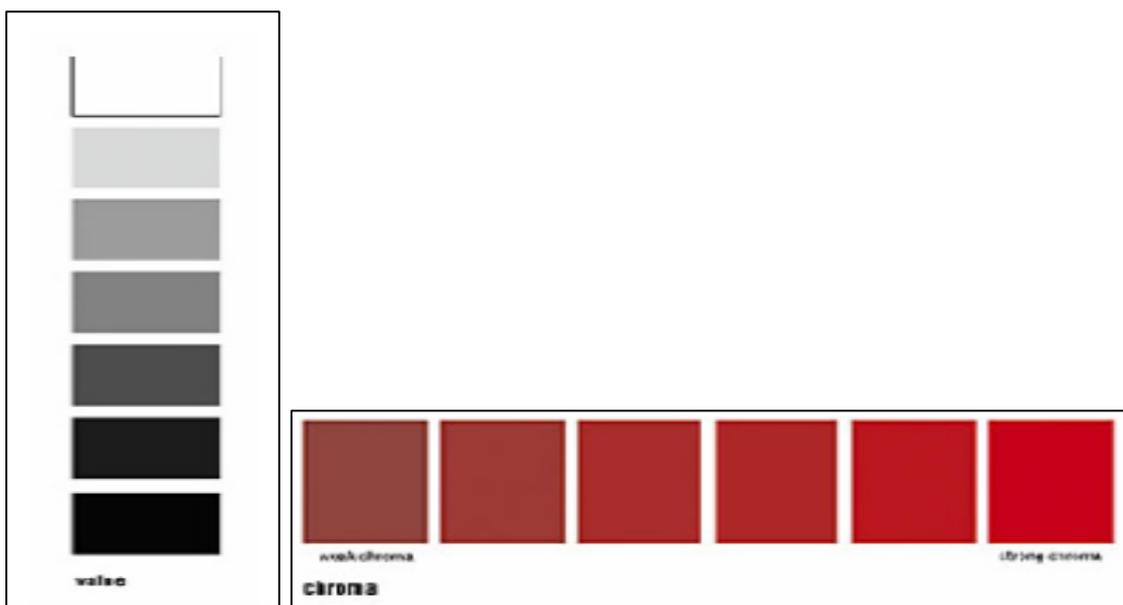


Figura 3. Intensidad y pureza de los colores en la tabla de Munsell.



Figura 4. Algunas hojas de la tabla de Munsell (http://edafologia.ugr.es/programas_suelos/practclas/abcsol/comun/munsells.htm).

El color oscuro de un suelo se puede deber al contenido de materia orgánica muy descompuesta, denotando alto contenido de humus o de pequeñas partículas envueltas en materiales húmicos altamente polimerizados. En suelos con escaso contenido de materia orgánica el exceso de sodio puede formar colores oscuros debido a la disolución de la materia orgánica que se presenta con valores de pH muy alcalinos y que tiende a migrar a la superficie. El color oscuro del suelo también puede ser producido por la presencia de óxidos de manganeso o carbón elemental inmediatamente después de la quema. El suelo húmedo presentará un color más oscuro que el del suelo seco. El horizonte superficial del suelo es comúnmente, más oscuro, por su alto contenido de humus (Flores y Alcalá 2010).

Tabla 5. Relación color y propiedades del suelo.

Color	Propiedades del suelo
Oscuro o negro	Presencia de materia orgánica, cuanto más oscuro más contenido de materia orgánica. Característico del horizonte A.
Claro o blanco	Se debe a los carbonatos de calcio y magnesio o al yeso u otras sales más solubles.
Pardo amarillento	Se debe a la presencia de óxidos de hierro hidratados, unidos a la arcilla y a la materia orgánica.
Rojos	Se debe a la liberación de óxidos de fiero. Este color indica un buen drenaje, lo que permite la existencia de condiciones oxidantes. Están asociados a condiciones de pH ácido y a una baja fertilidad del suelo.
Grisés y/o verdoso azulado	Son característicos de suelos que sufren una intensa hidromorfia. Hay falta de oxígeno.

Fuente: Jordán (2006).

2.2.2. Materia orgánica en el suelo (MOS)

El término MOS se utiliza para describir los constituyentes orgánicos en el suelo en diversas etapas de descomposición, tales como tejidos de plantas y animales muertos, materiales de menos de 2 mm de tamaño y organismos del suelo. La MOS contiene aproximadamente 55 - 60% de C en masa (FAO 2017).

Picone (2006), citado por Eyherabide *et al.* (2014) señala que la materia orgánica de los suelos comprende un amplio rango de sustancias carbonadas, incluyendo: la biomasa microbiana, restos vegetales y/o animales en descomposición y mezclas amorfas coloidales de sustancias orgánicas complejas de alto peso molecular (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas).

El contenido de materia orgánica es mayor en el horizonte A del suelo. Se acepta que hay una relación general directa entre el contenido de materia orgánica del suelo y la altitud: a > altitud > acumulación de materia orgánica. Este

comportamiento está relacionado con el hecho de que al aumentar la altitud se reduce la temperatura, lo que ocasiona una disminución en la tasa de descomposición de ésta, produciéndose su acumulación (Jaramillo 2002).

En suelos agrícolas, la materia orgánica suele representar el 1 – 3% de los constituyentes del suelo, mientras que en suelos forestales, este porcentaje puede elevarse mucho. El horizonte superficial es, normalmente, el que contiene un mayor contenido en materia orgánica, mientras que el contenido va disminuyendo progresivamente con la profundidad. Solamente bajo determinadas condiciones de precipitación y drenaje del suelo puede acumularse materia orgánica en profundidad a causa del intenso lavado de los horizontes más superficiales (Jordán 2006).

Según Jenny (1930) y Cobertera (1986), citado por Jordán (2006) existe una estrecha relación entre la temperatura media anual, la precipitación y el contenido de materia orgánica de los suelos bajo las mismas técnicas de cultivo. El clima influye tanto en la producción de biomasa de los ecosistemas como en la transformación posterior de la materia orgánica en el suelo.

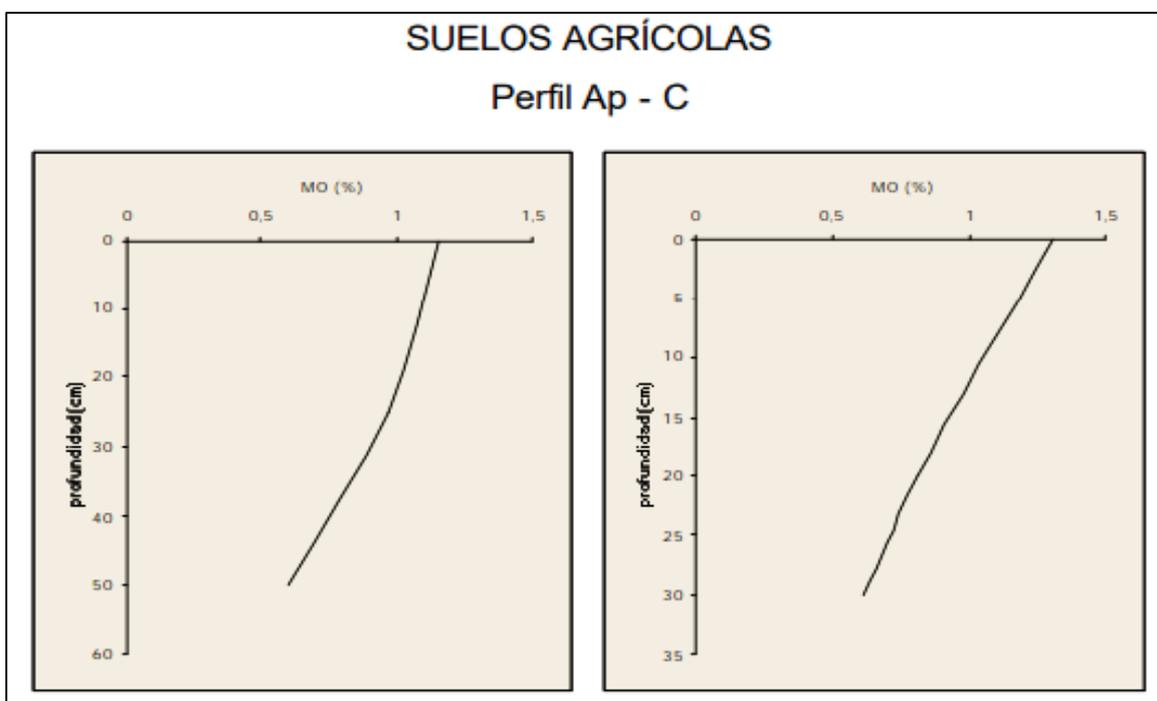


Figura 5. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos agrícolas (Jordán 2006).

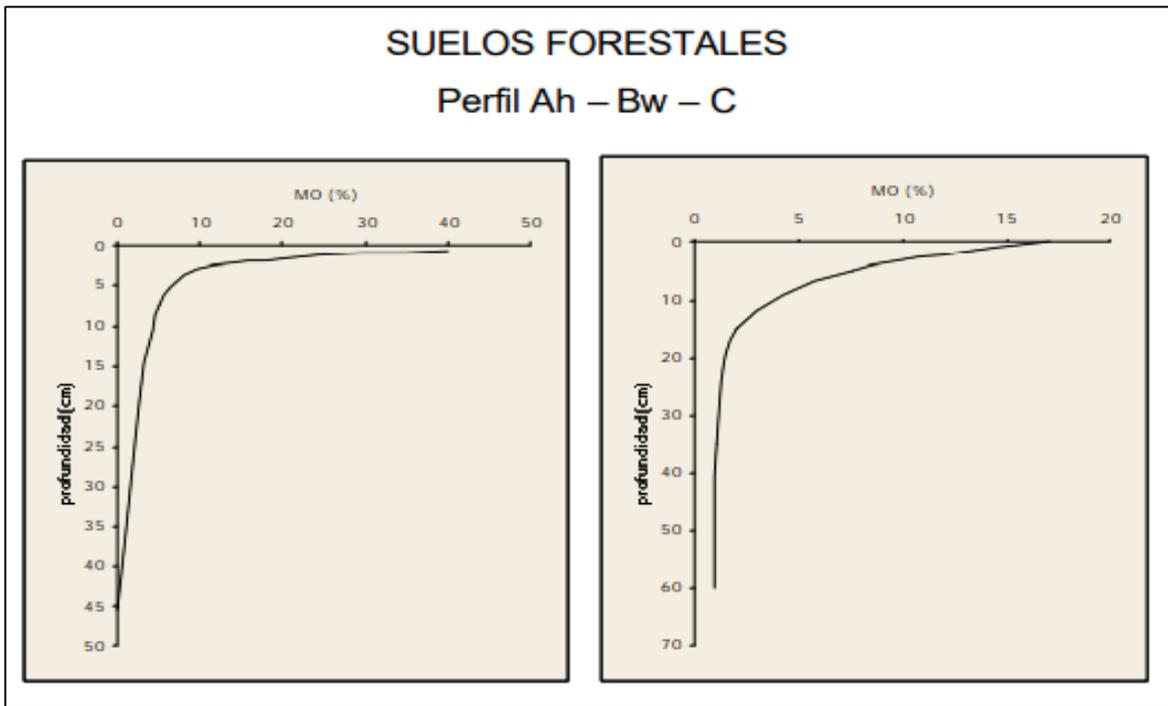


Figura 6. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos Forestales (Jordán 2006).

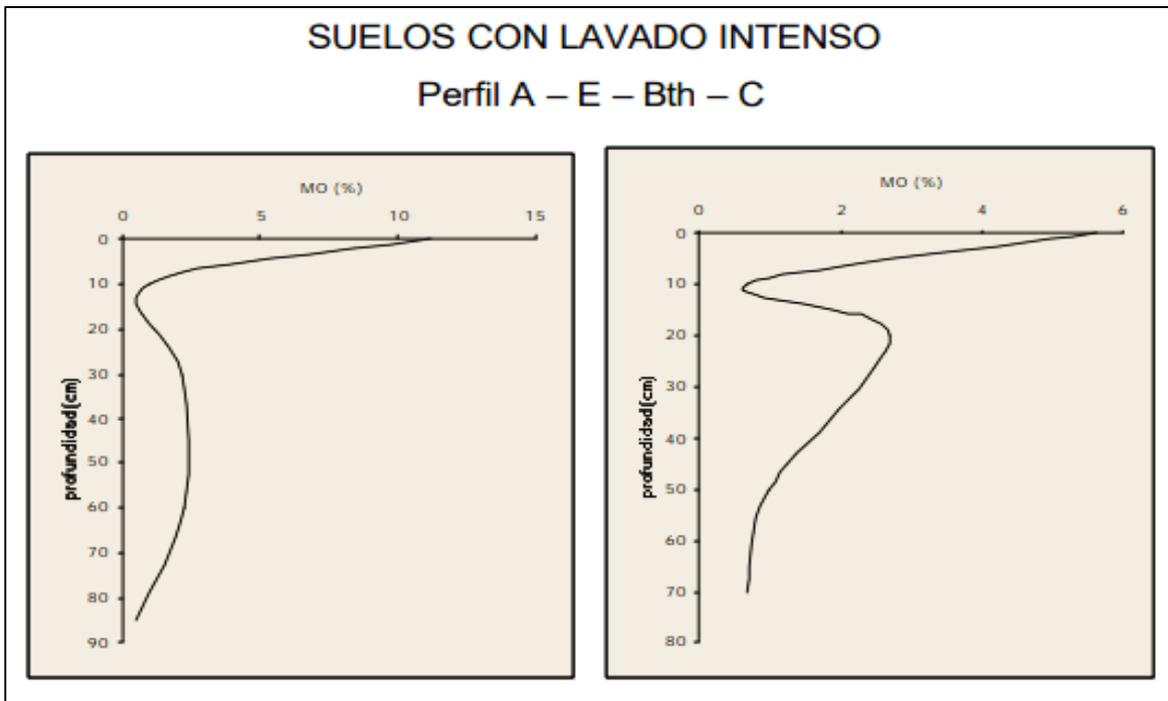


Figura 7. Distribución de la materia orgánica en profundidad en suelos con lavado intenso (Jordán 2006).

Tabla 6. Relación entre materia orgánica y tipo de estructura del suelo.

Materia orgánica (%)	Tipo de estructura
7	Granular
5	Bloques angulares
1,5	Grano simple
5	Laminar y grano simple
1	Columnar

Fuente: Rucks *et al.* (2004).

Para determinar el nivel de materia orgánica del suelo se utiliza la siguiente tabla.

Tabla 7. Niveles de materia orgánica del suelo.

Nivel	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: NOM-021-SEMARNAT (2000).

2.2.3. El carbono

El carbono es un elemento sumamente importante e imprescindible. Se trata de uno de los más abundantes en el universo. En nuestro planeta, el carbono representa el 0,2 % de la corteza y puede hallarse en todas las formas de vida que habitan la Tierra. Si no existiera el carbono, no existiría la vida (Pino 2015).

El carbono presenta una gran afinidad para enlazarse químicamente con otros átomos pequeños, incluyendo otros átomos de carbono con los que puede formar largas cadenas, y su pequeño radio atómico le permite formar enlaces múltiples. Así, con el oxígeno forma el dióxido de carbono, vital para el crecimiento de las plantas y con el hidrógeno forma numerosos compuestos denominados genéricamente hidrocarburos, esenciales para la industria y el

transporte en la forma de combustibles fósiles y combinado con oxígeno e hidrógeno forma gran variedad de compuestos como, por ejemplo, los ácidos grasos, esenciales para la vida, y los esteroides que dan sabor a las frutas y además es vector, a través del ciclo carbono - nitrógeno, de parte de la energía producida por el sol (Mercado 2017).

El carbono existe en el aire mayormente como dióxido de carbono (CO_2) gaseoso, el cual se disuelve en el agua y reacciona con las moléculas de esta para producir bicarbonato (HCO_3^-). La fotosíntesis que llevan a cabo las plantas terrestres, las bacterias y las algas, convierte el CO_2 o el HCO_3^- en moléculas orgánicas. Las moléculas orgánicas producidas pasan a través de las cadenas alimenticias, y la respiración celular convierte nuevamente el carbono orgánico en dióxido de carbono gaseoso (Khan Academy 2015).

2.2.4. Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS). El COS es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por los organismos vivos (FAO 2017).

A escala global, los suelos son el mayor reservorio terrestre de carbono y por lo tanto tienen una mayor influencia en la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. El Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (GICC) estimó el COS acumulado en el primer metro del suelo en 1 502 billones de toneladas. Las estimaciones mundiales actuales derivadas de la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo (BDASM) sugieren que aproximadamente 1 417 billones de toneladas de COS están almacenados en el primer metro de suelo y alrededor de 716 billones de toneladas de COS en los 30 cm superiores (FAO y GTIS 2015).

Según la FAO y GTIS (2015) la pérdida de carbono orgánico del suelo (COS) es la pérdida de carbono orgánico almacenado en el suelo; ocurre principalmente debido a:

- ✓ La conversión del carbono del suelo en dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄), siendo ambos gases de efecto invernadero.
- ✓ La pérdida física de carbono del suelo por la erosión.

Globalmente el impulsor primario de la pérdida del COS del suelo es el cambio en el uso del territorio. Un meta - análisis de 74 publicaciones realizado en 2002 en las zonas tropicales y templadas mostró una declinación en el almacenamiento de C en el suelo después de la conversión de pastizales a plantaciones (-10%), bosques nativos a plantaciones (-13%), bosque nativo a cultivo (-42%), y pastizal a cultivo (-59%). El almacenamiento de C del suelo se incrementó después de las conversiones de bosque nativo a los pastos (+8%), cultivos a pastos (+19%), cultivos a pastizal (+18%), y cultivos a bosque secundario (+53%). Los cambios relativos fueron igualmente altos tanto en el subsuelo como en la superficie del suelo (FAO y GTIS 2015).

2.2.5. Carbono en los ecosistemas forestales

Según la FAO (2002) los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos, que contienen cerca del 40% del total del carbono, son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación o tala ese equilibrio es afectado.

A su vez la FAO (2002) indica que todos los cambios en el manejo de tales ecosistemas inducen cambios importantes en la dinámica del carbono, dando lugar a menores existencias de carbono que en el bosque original. Estas formas de manejo incluyen la agricultura de roza, tumba y quema, la deforestación y la agro-silvicultura.

De acuerdo a Dixon *et al.* (s.f.), citado por Ordoñez y de Jong (2001) la vegetación asimila dióxido de carbono atmosférico, por medio del proceso fotosintético. Los árboles en particular, asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo capturan y conservan

más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra.

Según Ordoñez y de Jong (2001) la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales es muy compleja, por lo que, para hacer una estimación de los cambios en el almacenamiento de carbono, es necesario analizar la cantidad de carbono en los distintos componentes que integran los ecosistemas y las transferencias de carbono entre ellos en el tiempo y el espacio. Esto implica analizar conjuntamente la dinámica del carbono en: vegetación (aérea y subterránea), suelo (incluyendo materia en descomposición) y productos forestales.

Del mismo modo, la FAO (2000) menciona que los bosques desempeñan una función importante en la moderación del flujo neto de gas de efecto invernadero (GEI) entre la tierra y la atmósfera. Los bosques actúan como depósitos, almacenando carbono en la biomasa y los suelos. Actúan como sumideros de carbono cuando se aumenta su superficie o su productividad, dando origen a un incremento de la absorción de CO₂ atmosférico. Por el contrario, actúan como fuente de GEI cuando la quema y la descomposición de la biomasa y las alteraciones del suelo dan origen a emisiones de CO₂ y otros GEI. En la actualidad, el 20% aproximadamente de las emisiones antropogénicas mundiales de CO₂ se deben a cambios en el uso de la tierra (y sobre todo a la deforestación que tiene lugar principalmente en las zonas tropicales).

La fijación de carbono en especies leñosas perennes se basa en dos premisas; primero, el CO₂ es un gas atmosférico que circula en el planeta, por lo tanto, las actividades dirigidas a eliminar GEI de la atmósfera tendrán la misma eficacia tanto si se realiza cerca de las fuentes de emisiones, como en el extremo opuesto del globo terrestre; segundo, las plantas absorben CO₂ de la atmósfera en el proceso de fotosíntesis y la utilizan para sintetizar azúcares y otros compuestos orgánicos utilizados en el crecimiento y el metabolismo (Moura 2001).

En un estudio realizado por Post *et al.* (s.f.), citado por Cifuentes *et al.* (s.f.), se encontró que los depósitos de C en suelos de bosque secundario son similares a los suelos de bosque primario, dependiendo de la edad del bosque secundario.

Tabla 8. Niveles de carbono orgánico del suelo.

Clasificación	Carbono orgánico (t ha⁻¹)
Muy alto	> 150
Alto	100 - 150
Medio	50 - 100
Bajo	< 50

Fuente: Vela *et al.* (2009).

2.2.6. Mecanismos para un desarrollo limpio (MDL)

EL MDL permite que un país industrializado del Anexo I invierta en otros países no Anexo I, para la ejecución de proyectos de reducción de emisiones o de deforestación y proyectos de reforestación generadores de créditos de emisiones (Godoy 2008).

Entre los prerequisites más relevantes son el contribuir al desarrollo sostenible del país anfitrión y la adicionalidad. El concepto de adicionalidad está definido en el párrafo 43 de la decisión 1 de la Conferencia de las Partes (COP) N° 7 que señala textualmente que: “una actividad MDL es adicional si las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero por fuentes son reducidas por debajo de aquellas que hubiesen ocurrido en ausencia del proyecto MDL registrado” (Godoy 2008).

2.2.7. REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques)

Se denomina REDD + a la reducción de emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal; además de la conservación, el manejo sostenible y el mejoramiento del stock de carbono de los bosques en los países en desarrollo (UICN). A través de la Estrategia Nacional REDD+ se pretende pagar por el

mantenimiento de los bosques al brindarles un mayor valor por mantenerlos en comparación con el valor de talarlos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia).

El país que registra más actividades REDD+ es Indonesia, con 67 iniciativas, seguido por Kenya (43), Perú (41), Brasil (39) y México (37). Un claro ejemplo de la compensación de emisiones de carbono se dio en marzo del 2013, cuando la Walt Disney Company adquirió \$3,5 millones en bonos de carbono en el Bosque de Protección Alto Mayo, que equivalen a 437 000 toneladas. La compañía pagó por bono siete veces más de su valor en el mercado (MINAM 2013).

2.2.8. Bonos de carbono

La transacción de los bonos de carbono permite mitigar la generación de GEI, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido (BioPlanet 2018). Quienes reducen emisiones o secuestran carbono reciben pagos y quienes tienen que reducir sus emisiones pueden comprar créditos para compensar sus emisiones. Los precios recibidos por una tonelada de CO₂ varían mucho y dependen del tipo de mercado y del tipo de proyecto de compensación de carbono. Durante 2009, los precios abarcaban desde 1,90 a 13 euros (€) por tonelada de CO₂ (FAO, 2010).

2.3. Bases metodológicas

Se han desarrollado una gran cantidad de técnicas analíticas que permiten cuantificar tanto el contenido de materia orgánica (MO), como el de carbono orgánico total (COT) o el C fácilmente oxidable (CFO) (Eyherabide *et al.* 2014).

2.3.1. Método de Walkley y Black (método de oxidación húmeda)

El método de Walkley y Black es el más utilizado en laboratorios debido a que no demanda de equipos sofisticados. La importancia de seleccionar el método de oxidación húmeda es que éste no incluye el conteo de carbonatos (Rügnitz *et al.* 2009).

Consiste en la oxidación húmeda de la muestra de suelo con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido. El calor desprendido, durante la incorporación del ácido sulfúrico (H_2SO_4), es el que permite la oxidación parcial del C ($120^\circ C - 140^\circ C$). En este proceso se produce una reducción del dicromato, equivalente al contenido de C que es oxidado (Arrieché 2014).

Los iones $Cr^{+3} = CO$ orgánico de acuerdo a la reacción siguiente:



Este método solo estima el carbono fácilmente oxidable (CFO), por lo que se utiliza un factor de corrección que varía del 63 al 86%, dependiendo del tipo de suelo y horizonte, para estimar el carbono orgánico total (COT). El factor de corrección generalmente utilizado es 1,32 debido a que se asume que en promedio se oxida el 76% del COT (Rosell *et al.* 2001 citado por Rüginitz *et al.* 2009).

El factor de conversión de carbono orgánico a materia orgánica (factor de Van Benmelen) es $C (\%) * 1.724 = MO (\%)$.

El procedimiento a realizar es el siguiente (Morocho 2017).

- ✓ Se pesan entre 0,2 y 2 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm (o al tamaño de la fracción requerida), dependiendo del color del suelo: más oscuro menos cantidad y viceversa.
- ✓ Se coloca la muestra en un Erlenmeyer de 250 ml y se le adicionan 5 ml de dicromato de potasio 1N ($K_2Cr_2O_7$ 1N) y 10 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), se agita y se deja enfriar; hay que tener precaución en este punto pues la reacción que se presenta es violenta.
- ✓ Cuando se enfría el conjunto anterior (45 minutos aproximadamente), se diluye con 50 ml de agua destilada (H_2O) y se le agregan 5 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) y 3 gotas de difenilamina ($C_{12}H_{11}N$) o 5 gotas de ortofenantrolina ($C_{12}H_8N_2$).
- ✓ Se prepara un blanco, es decir, una mezcla de todos los reactivos mencionados pero sin suelo.

- ✓ Se titulan la mezcla inicial y el blanco con una solución de sulfato ferroso amoniacal 1N (FeSO₄), la titulación está completa cuando se obtiene un color verde.
- ✓ Se calcula el contenido de carbono orgánico con la ecuación siguiente:

$$\%CFO = \frac{V(1-M/B) \times 0.003}{pm}$$

Dónde:

%CFO = porcentaje de carbono fácilmente oxidable.

V = Volumen de dicromato de potasio empleado en la muestra y el blanco.

M = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado en la titulación de la muestra.

B = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado en la titulación del blanco.

Pm = Peso de la muestra de suelo.

- ✓ Se transforma el contenido de carbono fácilmente oxidable a contenido de carbono orgánico total, mediante la relación:

$$\%COT = \%CFO \times 1.32$$

Dónde:

%COT = porcentaje de carbono orgánico total.

%CFO = porcentaje de carbono fácilmente oxidable.

- ✓ Para calcular el COS en t ha⁻¹ se utiliza la siguiente ecuación (Honorio y Baker 2010):

$$COT (t ha^{-1}) = \%C * Da * 100 * P$$

Donde:

%C = Porcentaje de carbono

Da = Densidad aparente (g cm⁻³)

P = Profundidad de la capa de muestreo (m)

2.3.2. Calcinación o Ignición

El método de calcinación o pérdida por ignición cuantifica directamente el contenido de MO y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas. Existen numerosos trabajos donde se utilizan temperaturas de ignición que van desde los 250 a los 600 °C en mufla y diferentes períodos de tiempo, desde 2 hasta 24 h (Combs y Nathan 1998, citado por Eyherabide *et al.* 2014).

Según Nelson y Sommers (1996) citado por Andrade (2013) la calcinación se debe realizar con las temperaturas de 350 y 440 °C por un período de tiempo de 6 a 8 horas. A estas temperaturas se evita la destrucción de los carbonatos inorgánicos que pueden estar presentes en la muestra. Cabe resaltar que con este método algunos minerales de arcilla pierden agua estructural o grupos hidroxilo a las temperaturas usadas para la combustión de las muestras. La pérdida de agua estructural llevara a la sobreestimación del contenido de materia orgánica en los resultados. Uno de los medios para evitar ese problema es a través del pre tratamiento de la muestra a través de la eliminación de la materia mineral usando HCl y ácido HF.

Este método produce errores en la determinación de MO por pérdida de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ion ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos (Rosell 2001, citado por Burgos *et al.* 2012).

El método de pérdida por ignición se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura de 430 °C en horno-mufla durante 24 h. Con temperaturas de 430 °C se lograría una completa oxidación de la MO. Así este método permite la determinación de la MO total del suelo, incluyendo las formas condensadas, humus, humatos y residuos orgánicos poco alterados (Davies 1974, citado por Burgos *et al.* 2012).

Este método resulta razonablemente preciso en la estimación de MO del suelo si se consideran precauciones para evitar errores por higroscopicidad y contenido de sales (Rosell 2001, citado por Burgos *et al.* 2012). Martínez *et al.*

(2017) realizaron un estudio y determinaron que al aumentar la temperatura de calcinación aumentaba el contenido de MOS.

El procedimiento a realizar es el siguiente (Morocho 2017):

- ✓ Se pesa una muestra de 6 o 7 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm (o en la fracción requerida) y se coloca en crisoles de porcelana.
- ✓ Se seca el conjunto (la muestra y el crisol) en horno a 105° C hasta peso constante (aproximadamente entre 24 y 48 horas), se retira del horno y se deja enfriar en desecador, luego se pesa.
- ✓ Se calcina la muestra en una mufla a 650 o 700° C, durante 3 o 4 horas.
- ✓ Se retira de la mufla el conjunto, se deja enfriar en desecador y se pesa nuevamente.
- ✓ Se calcula la diferencia de peso entre las medidas antes y después de calcinar; esta diferencia de peso equivale a la cantidad de materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la calcinación.
- ✓ Se expresa la diferencia de peso en porcentaje (%), con respecto al peso inicial de la muestra (seca a 105° C) y ese es el porcentaje de materia orgánica que tenía aquella.

$$\% \text{ MO} = \frac{(\text{PS}_{105^\circ \text{C}} - \text{PS}_{\text{Calcinado}})}{(\text{PS}_{105^\circ \text{C}} - \text{P}_{\text{Crisol}})} * 100$$

Donde:

PS _{105 °C} = peso de la muestra a 105 °C incluido el peso del crisol (g).

PS _{Calcinado} = peso de la muestra calcinada incluido el peso del crisol (g).

PS _{Crisol} = peso del crisol (g).

- ✓ Se calcula el contenido de carbono orgánico con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ CO} = \frac{\% \text{ MO}}{1.724}$$

Donde:

%CO = Porcentaje de Carbono Orgánico

%MO = Materia Orgánica del Suelo

2.3.3. Determinación del contenido de materia orgánica en el suelo con agua oxigenada

En este método se oxida la materia orgánica con agua oxigenada. Por diferencia entre el peso de la muestra inicial seca y el peso seco después del tratamiento, se calcula la proporción de materia orgánica volatilizada mediante la oxidación (CEDEX 2001).

Este método es solamente aproximado, pues aunque el agua oxigenada ataca al humus y a la materia orgánica coloidal, su acción sobre la materia orgánica no descompuesta es sólo limitada (CEDEX 2001).

Según la Norma NLT-117/72 del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) de España, el procedimiento para determinar la materia orgánica es la siguiente:

- ✓ El suelo seco al aire y tamizado a 2 mm se pulveriza con el mortero, luego se seca en la estufa. De este suelo seco se pesa 20 g de muestra (o en la fracción requerida) y se coloca en el vaso de precipitado previamente seco y tarado.
- ✓ Añadir 100 ml de agua oxigenada de 20 volúmenes y agitar.
- ✓ Colocar el vaso, tapar con el vidrio de reloj, sobre la plancha de calefacción a 60 °C durante dos horas, y agitar con la varilla de vez en cuando.
- ✓ Al final de las dos horas, añadir una pequeña cantidad de agua oxigenada. Si aún da reacción, lo cual se aprecia por la efervescencia, añadir otros 100 ml de agua oxigenada. Repetir el proceso anterior cuantas veces sea necesario hasta que al hacer la prueba de añadir una pequeña cantidad, después de las dos horas, no se produzca reacción.

- ✓ Evaporar el agua (preferiblemente al baño maría) y después acabar de secar en estufa y pesar con precisión de 0,01 g.
- ✓ La materia orgánica se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MO} = \frac{P - P'}{P} * 100$$

Donde:

MO = Materia Orgánica del suelo.

P = Peso de la muestra inicial seca ensayada.

P' = Peso de la muestra seca después del ensayo.

- ✓ El contenido de carbono orgánico se calcula a partir del porcentaje de MO, con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CO} = \frac{\% \text{ MO}}{1.724}$$

Donde:

%CO = Porcentaje de Carbono Orgánico.

%MO = Materia Orgánica del Suelo.

2.4. Definición de términos

2.4.1. Bosque nativo

Ecosistema arbóreo, primario o secundario, regenerado por sucesión natural, que se caracteriza por la presencia de árboles de diferentes especies nativas, edades y tamaños variables, con uno o más estratos. Cumple con los siguientes criterios de estructura (Ministerio del ambiente del Ecuador 2012):

- ✓ Altura del dosel mayor o igual a 5 m.
- ✓ Cobertura del dosel mayor o igual a 30%.
- ✓ Área mínima de 1 ha.

2.4.2. Bosque primario

Un bosque primario o bosque nativo es un bosque intacto (u original), y con un alto grado de naturalidad que nunca ha sido explotado, fragmentado, o influenciado directa o indirectamente por el hombre (EcuRed 2018).

2.4.3. Bosque secundario

Los bosques secundarios son los bosques regenerados de hace mucho tiempo sobre un bosque antes destruido, significativamente modificado o explotado por el hombre. Éstos no llegan a tener el grado de biodiversidad, o sea la riqueza de especies, de los bosques primarios (EcuRed 2018).

2.4.4. Mineralización

Proceso biológico que ocurre mediante la conversión de la materia orgánica a un estado inorgánico, a través de la acción de microorganismos (EcuRed 2016).

2.4.5. Humificación

Proceso de conversión de la materia orgánica a un estado inorgánico, mediante el cual aparecen las sustancias negras y bioestables que denominamos humus. Estas sustancias se descomponen muy lentamente, lo que se denomina mineralización secundaria (Gallardo 2001).

2.4.6. Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos (García 2001).

2.4.7. Semi - calicata

Son excavaciones rectangulares, cuadradas de 40 a 50 cm de lado o 50 cm de diámetro y con profundidad suficiente para estudiar hasta el horizonte B, si existe, o para describir los primeros 40 o 50 cm de perfil; se complementa hasta 120 cm o más mediante un barreno (Mendoza y Espinoza 2017).

2.4.8. Hoyo

Cavidad que se abre en la tierra para sembrar, meter o enterrar uno o varios objetos (Revista Electrónica de Divulgación Científica Forestal s.f.).

2.4.9. Carbono orgánico

Se presenta en suelos originados de materiales orgánicos e inorgánicos; la mayor parte se encuentra en la materia orgánica y en los minerales carbonatados. El carbono orgánico interacciona con las arcillas del suelo

mejorando la actividad biológica, la estructuración, la aireación, la infiltración, la penetración radicular y la resistencia a la erosión (Mendoza y Espinoza 2017).

2.4.10. Muestra simple (submuestra)

La muestra colectada en un tiempo y en un lugar particular es llamada muestra simple. Esta representa las condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue colectada (Mendoza y Espinoza 2017).

2.4.11. Muestra compuesta

Es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (submuestras), convenientemente mezcladas, las cuales son llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis, siendo el resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado (Mendoza y Espinoza 2017).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características del área de estudio

El presente trabajo se realizó en un bosque primario y secundario del caserío La Palma del distrito de Chadín, provincia de Chota, departamento de Cajamarca. El clima es cálido, templado y frío, la temperatura media anual varía entre 12 °C y 17 °C, la precipitación pluvial varía entre 1900 y 3800 mm, la evapotranspiración es de 0.25 a 0.5 veces la precipitación. La topografía del lugar es accidentado, presenta pendientes, llanuras y zonas boscosas. El caserío La Palma tiene como punto de referencia las coordenadas UTM 786632 (Este) y 9285956 (Norte).

El área de estudio se ubica en la zona de vida bosque muy húmedo Montano Tropical (bmh - MT) y el suelo se caracteriza por tener pendientes muy empinadas, profundidad efectiva superficial, drenaje algo excesivo, pH moderadamente ácido (5.1 – 6.5), materia orgánica alta, pedregosidad ligeramente pedregoso y perfil A(B)C.

Tabla 9. Ubicación del caserío La Palma.

Departamento	Provincia	Distrito	C.P.	X – Coord.	Y – Coord.	Altitud (msnm)
Cajamarca	Chota	Chadín	La Palma	786632	9285956	2714

Bosque primario

El bosque primario tiene una extensión aproximada de 2.5 hectáreas, se encuentra a una altitud de 2629 msnm y como punto de referencia se ubica en las coordenadas UTM 786479 (Este) y 9284738 (Norte). En cuanto a la caracterización florística del bosque tenemos especies arbóreas y/o arbustivas como *Brunellia weberbaueri*, *Buddleja longifolia*, *Cinchona pubescens*, *Clusia flaviflora*, *Cupania cinerea*, *Delostoma integrifolium*, *Eugenia sp.*, *Ficus sp.*, *Freziera incana*, *Gordonia fruticosa*, *Guettarda dependens*, *Hedyosmum scabrum*, *Hyeronima asperifolia*, *Macrocarpaea sp.*, *Miconia sp.*, *Morus insignis*, *Oreopanax argentatus*, *Persea subcordata*, *Podocarpus oleifolius*, *Prunus*

ruiziana, *Solanum appressum*, entre otras. Las especies pertenecen a las familias Lauraceae, Podocarpaceae, Theaceae, Brunelliaceae, Melastomataceae, entre otras; siendo estas las más abundantes. También existen helechos arbóreos como *Cyathea caracasana* y una gran variedad de orquídeas, bromelias, helechos y musgos (Vargas 2013).

Bosque secundario

El bosque secundario en estudio tiene un área aproximada de 3 hectáreas, se encuentra a 2711 msnm y como punto de referencia se ubica en las coordenadas UTM 786919 (Este) y 9284740 (Norte). Las especies arbóreas y arbustivas que conforman este bosque son parecidas a la del bosque primario, la diferencia está en su distribución y frecuencia; además se ha podido observar que este bosque es más disperso que el bosque primario, la altura y diámetro de las especies arbóreas son menores en comparación con las del bosque primario. La *Axinaea nítida* y *Myrsine coriácea* son especies que crecen en bosques secundarios, así como especies del género *Chusquea* que crecen en bosques perturbados. Las orquídeas, bromelias, helechos y musgos son similares a las del bosque primario.

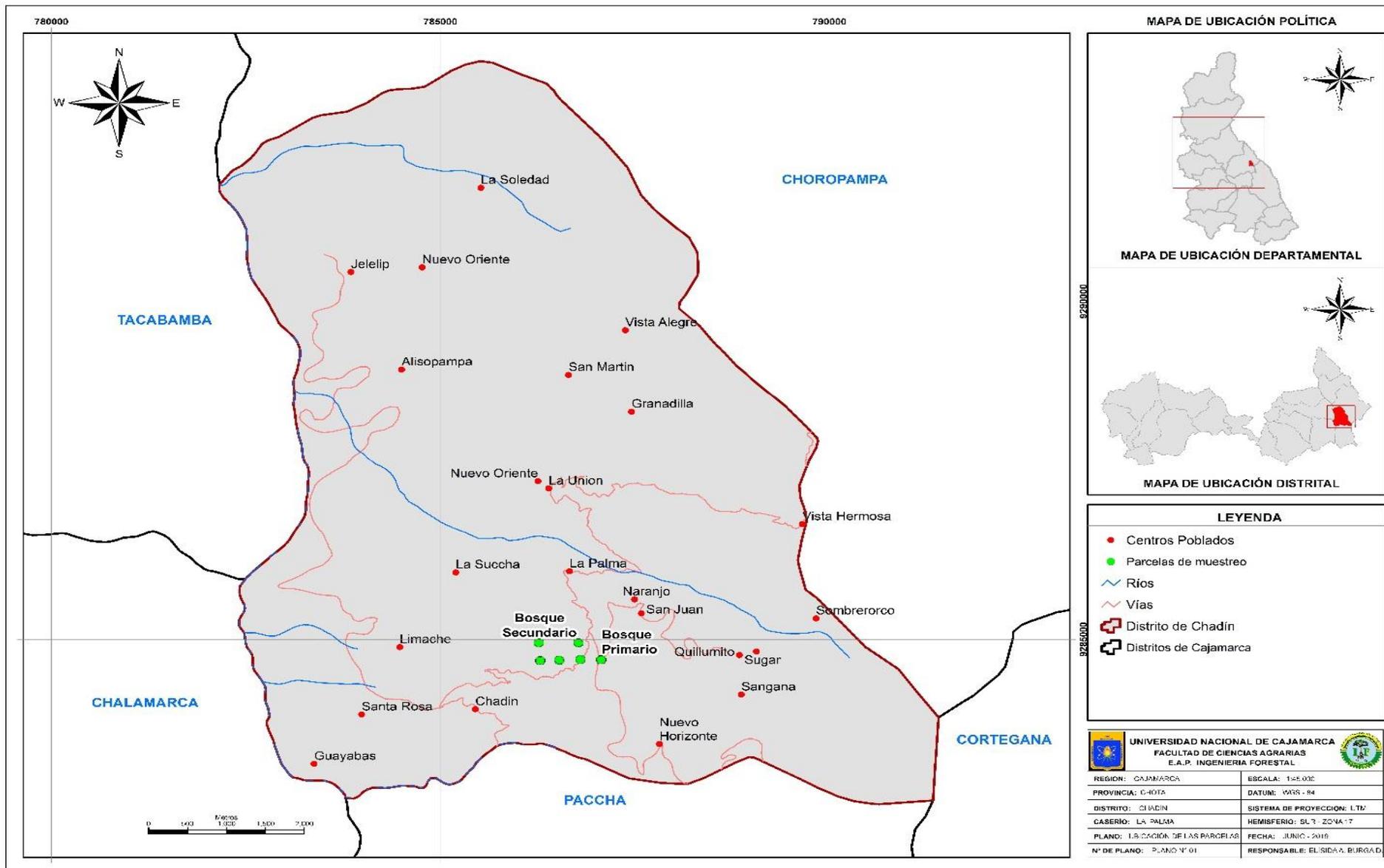


Figura 8. Ubicación del área de estudio en el distrito de Chadín.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales y equipos de campo

- ✓ Wincha de 30 m
- ✓ Cinta métrica
- ✓ Palana derecha
- ✓ Machete
- ✓ Cilindros metálicos
- ✓ Espátula
- ✓ Sobres manila de 11x18 cm
- ✓ Cinta Masking
- ✓ Formularios de campo
- ✓ Etiquetas
- ✓ Tableros
- ✓ Bolsas ziploc
- ✓ Fibra de nylon
- ✓ Receptor GPS
- ✓ Plumón indeleble
- ✓ Cámara fotográfica
- ✓ Cuchilla
- ✓ Martillo
- ✓ Útiles de escritorio
- ✓ Libreta
- ✓ Sacos de nylon

3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio

- ✓ Muestras de suelo
- ✓ Guía de colores Munsell para suelos
- ✓ Mortero
- ✓ Luna de reloj
- ✓ Tamiz
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Estufa
- ✓ Papel absorbente

- ✓ Erlenmeyer de 250 ml
- ✓ Dicromato de potasio
- ✓ Ácido sulfúrico concentrado
- ✓ Agua destilada
- ✓ Ácido fosfórico
- ✓ Difenilamina
- ✓ Ortofenantrolina
- ✓ Sulfato ferroso amoniacal

3.2.3. Materiales y equipos de gabinete

- ✓ Útiles de escritorio
- ✓ Laptop

3.3. Metodología

3.3.1. Fase de campo

La metodología aplicada a la presente investigación fue tomada del Manual de Campo publicado por el proyecto Evaluación Nacional Forestal (ENF) y el programa Nacional Conjunto ONU – REDD+ del Ministerio del Ambiente del Ecuador, bajo la cooperación del programa “Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático” FAO Finlandia y el componente ONU REDD FAO (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).

3.3.1.1. Diseño de muestreo

Para el levantamiento de información en campo se establecieron 3 parcelas en cada uno de los bosques (bosque primario y secundario). Las parcelas fueron cuadradas de 20 x 20 m, distribuidas en forma de “L” a una distancia de 290 m una de la otra. Para instalar las parcelas se empezó por la parcela lateral derecha de la L, luego para la izquierda y finalmente la parcela superior como se muestra en la Figura 9.

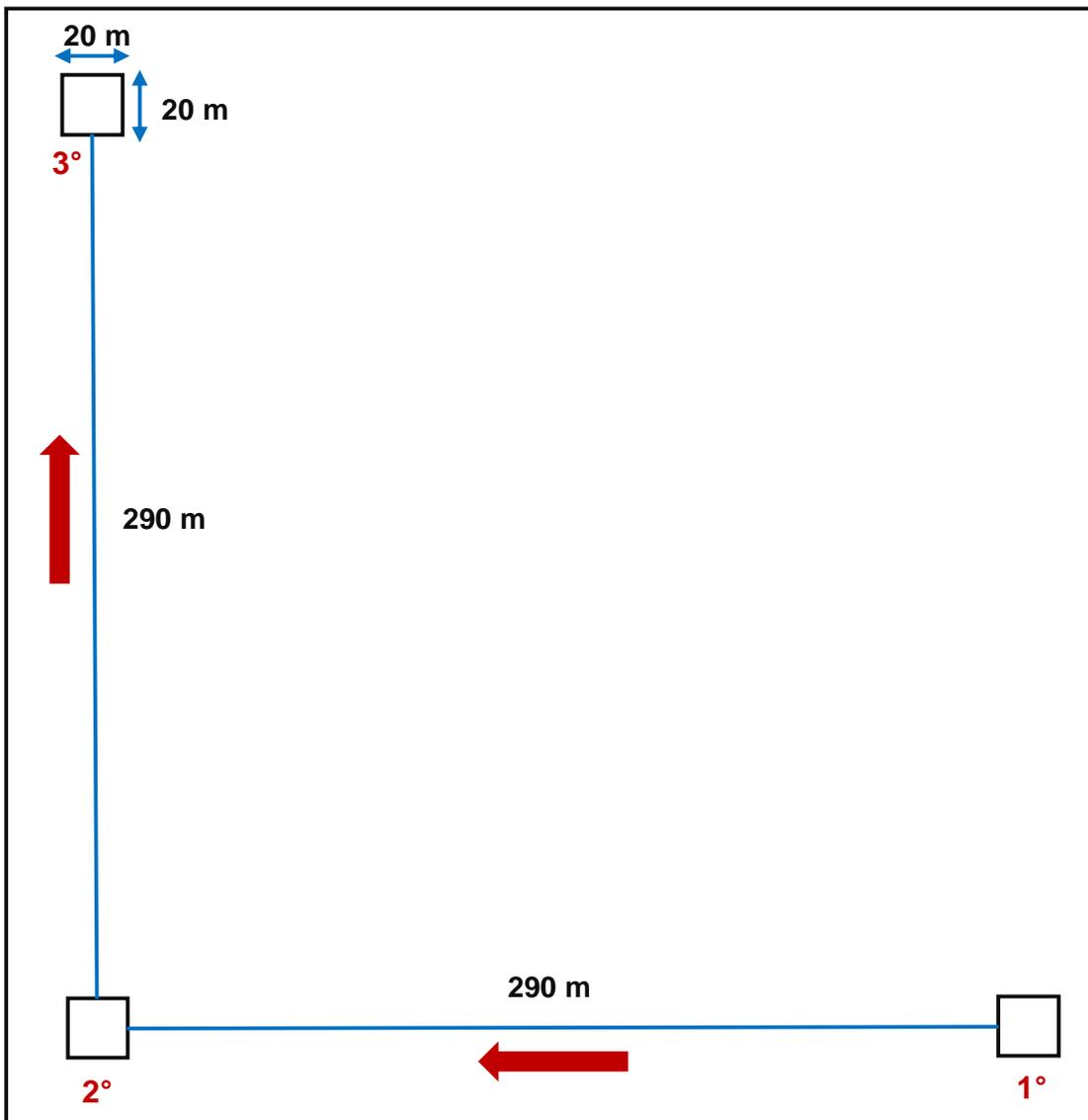


Figura 9. Diseño de la distribución de las parcelas de muestreo. Escala 1:2500.

Para el muestreo del suelo se establecieron cinco semi - calicatas cuadradas de 40 x 40 cm cada una, distribuidas en el centro y los 4 vértices de la parcela de 20 x 20 m. En estas semi - calicatas se tomaron las muestras de suelo a 3 profundidades: 0 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm de profundidad (ver Figura 10).

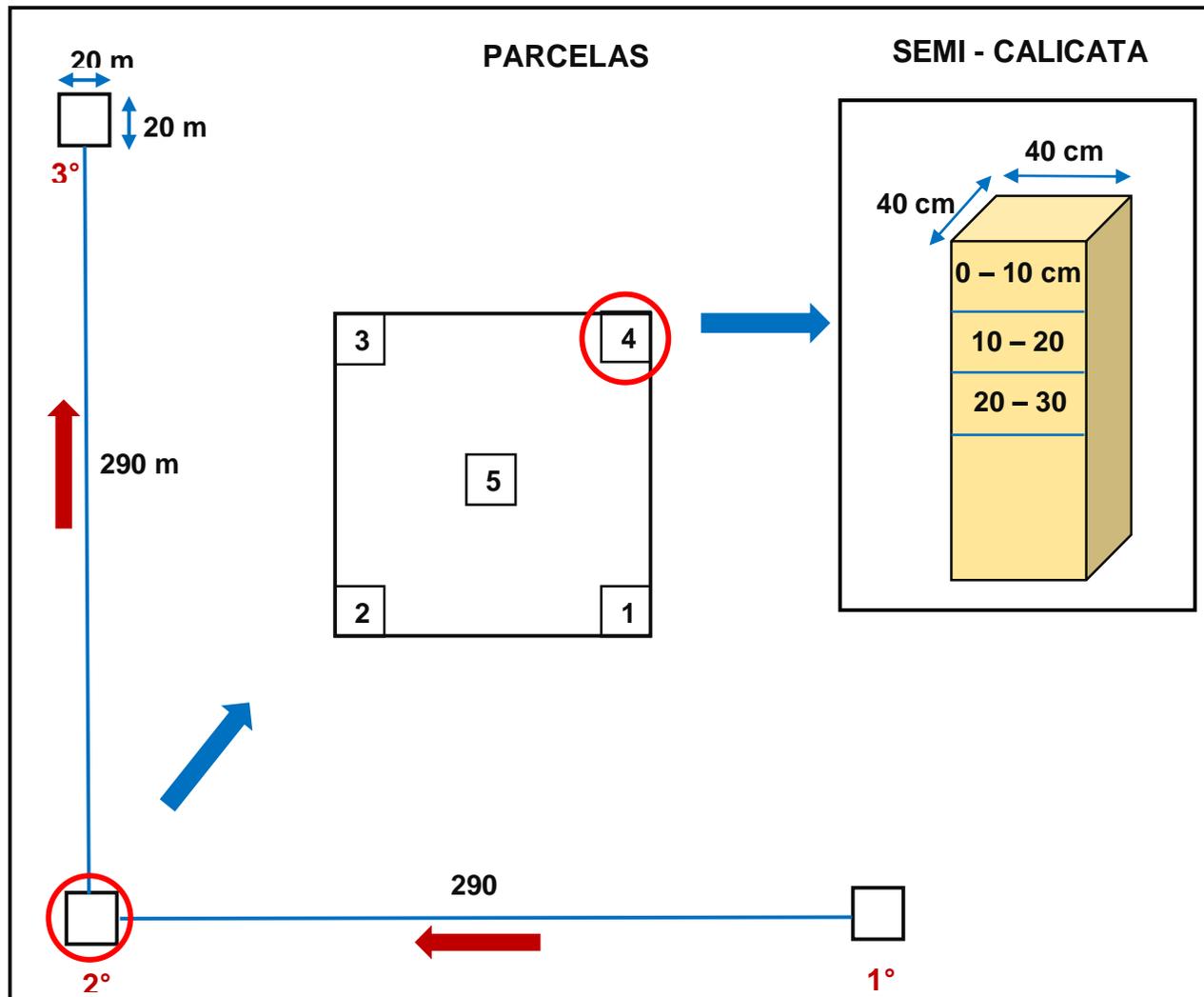


Figura 10. Distribución de las semi - calicatas en las parcelas de 20 x 20. Escala 1:2500.

3.3.1.2. Levantamiento de datos en las parcelas

Una vez dentro del bosque se delimitaron las parcelas utilizando fibra de nylon. Cada parcela fue georreferenciada en sus cuatro vértices con el GPS en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) (ver anexo 8).

Para realizar las semi - calicatas primero se removió la hojarasca, luego se empezaron a escavar las mismas. Las muestras recogidas sirvieron para determinar: el contenido de carbono, la densidad aparente y el color del suelo.



Figura 11. Georreferenciación y apertura de la semi - calicata.

Obtención de muestras para determinar carbono orgánico en el suelo

Una vez hecha la semi – calicata, en uno de los lados se midió hasta los 30 cm y se hizo marcas cada 10 cm. Con ayuda de una espátula se colectaron las muestras simples. Se extrajeron muestras simples de las 5 semi – calicatas de cada parcela de 20 x 20 m. Éstas se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta por cada profundidad, las cuales se guardaron en bolsas ziploc con su respectiva etiqueta.

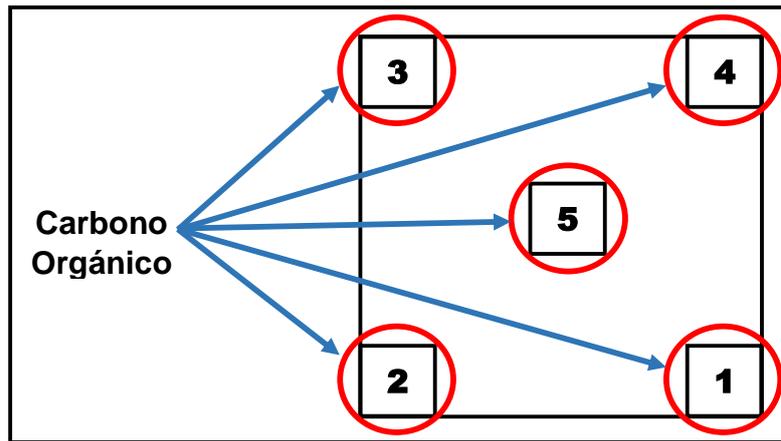


Figura 12. Distribución de las semi - calicatas en la parcela de las cuales se obtuvieron las muestras para determinar el contenido de carbono.



Figura 13. Midiendo la profundidad de la semi – calicata.



Figura 14. Recolección de muestras de suelo.

Obtención de muestras para determinar la densidad aparente del suelo

Las muestras se extrajeron solo de la calicata central (5) de las tres profundidades. Se introdujo el cilindro en forma perpendicular al perfil con ayuda de un martillo, luego se extrajo con una cantidad de pan de tierra para asegurar que el suelo ocupe todo el cilindro. Con ayuda de una cuchilla se cortó al ras la muestra de suelo en la parte inferior y superior del cilindro. El contenido del cilindro se depositó en un sobre manila de dimensiones 11x18 cm. Este sobre se colocó en una bolsa ziploc con su respectiva etiqueta.



Figura 15. Marca del cilindro en la recolección de muestras de suelo para determinar densidad aparente.



Figura 16. Cilindro con muestra de suelo para determinar densidad aparente.

Obtención de muestras para determinar el color del suelo

Se colectaron muestras de las 3 profundidades de la semi - calicata central de cada parcela. Estas muestras se guardaron en bolsas ziploc con su respectiva etiqueta.

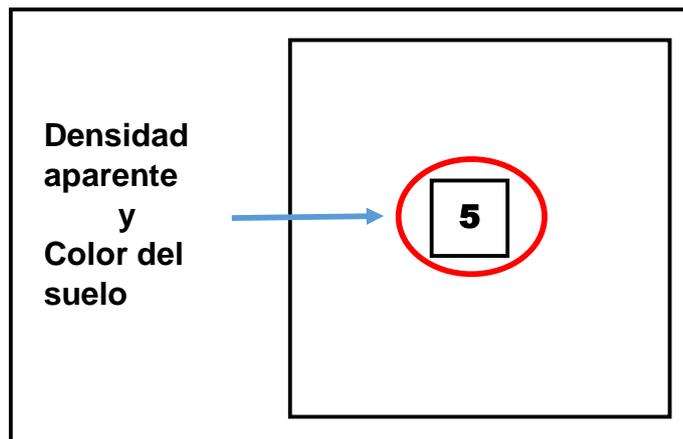


Figura 17. Semi - calicata de la cual se obtuvo las muestras para determinar la densidad aparente y el color del suelo.



Figura 18. Depositando la muestra de suelo en la bolsa ziploc.

3.3.2. Tipo de diseño experimental

Se realizó el diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial 2x3, con 3 repeticiones por tratamiento (combinaciones).

La Tabla 10 muestra el diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2x3. Los factores son bosque (primario y secundario) y profundidad (10, 20, 30 cm); resultando así 6 tratamientos que son: bosque primario a 10 cm, bosque primario a 20 cm, bosque primario a 30 cm, bosque secundario a 10 cm, bosque secundario a 20 cm y bosque secundario a 30 cm.

Tabla 10. Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial 2x3.

Factores	Niveles	Tratamientos/ combinaciones	Clave
Bosque	Bosque primario	Bosque primario de 0 - 10 cm	T1
	Bosque secundario	Bosque primario de 10 - 20 cm	T2
		Bosque primario de 20 - 30 cm	T3
Profundidad (cm)	0 - 10	Bosque secundario de 0 - 10 cm	T4
	10 - 20	Bosque secundario de 10 - 20 cm	T5
	20 - 30	Bosque secundario de 20 - 30 cm	T6

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA).

Factor de varianza	Grados de libertad
Bloque	2
Bosque (B)	1
Profundidad (P)	2
B x P	2
Error	12
Total	17

Variables cuantitativas

- ✓ Contenido de carbono orgánico
- ✓ Densidad aparente

Variable cualitativa

- ✓ Color del suelo

3.3.3. Fase de laboratorio

3.3.3.1. Determinación del contenido de carbono orgánico del suelo

Las muestras de suelo recogidas en campo para determinar el contenido de carbono orgánico fueron enviadas al Laboratorio de Servicio de Suelos del INIA en Baños del Inca para que sean analizadas. El método utilizado fue el de Walkley y Black (método de oxidación húmeda).

3.3.3.2. Determinación de la densidad aparente del suelo

Las muestras de suelo recogidas en campo para determinar la densidad aparente fueron analizadas en el Laboratorio de Edafología y Física de Suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca. El método utilizado fue del cilindro de volumen conocido, el procedimiento realizado fue el siguiente:

- ✓ Las muestras de suelo en los sobres manila fueron colocadas en la estufa a 105 °C durante 24 horas.
- ✓ Pasado este tiempo las muestras se sacaron de la estufa y se pesaron en la balanza analítica sin el sobre manila.



Figura 19. Pesado del suelo seco para determinar densidad aparente.



Figura 20. Registro de los datos del peso seco del suelo.

3.3.3.3. Determinación del color del suelo

Para determinar el color del suelo se utilizó la Tabla de Munsell y el procedimiento fue el siguiente:

- ✓ De cada muestra húmeda se sacó una pequeña cantidad de suelo y se colocó sobre un papel blanco.

- ✓ Luego con la Tabla de Munsell se fue comparando el color del suelo que más se asemejaba al de la tabla. El mismo procedimiento se realizó para las muestras en seco, es decir muestras secas al aire.

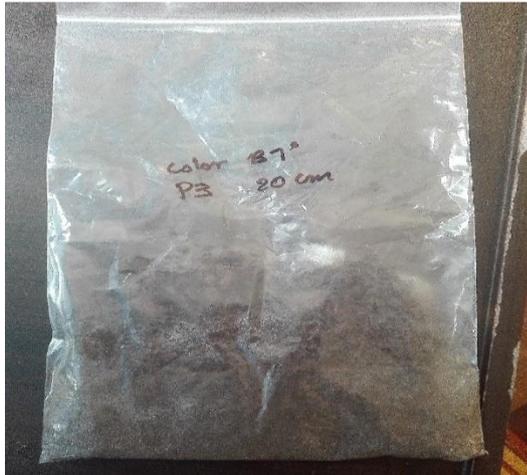


Figura 21. Muestra de suelo para determinar el color.



Figura 22. Determinando el color del suelo con la tabla de Munsell.

3.3.4. Fase de gabinete

3.3.4.1. Procesamiento y análisis de resultados de los datos de campo y de laboratorio

Carbono orgánico (t ha⁻¹)

Después de terminar el procedimiento de análisis de suelo en laboratorio, el contenido de carbono fácilmente oxidable se calculó con la siguiente ecuación (Walkley y Black 1934):

$$\% \text{CFO} = \frac{V(1-M/B) \times 0.003}{pm}$$

Dónde:

% CFO = porcentaje de carbono fácilmente oxidable.

V = Volumen de dicromato de potasio empleado en la muestra y el blanco.

M = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado en la titulación de la muestra.

B = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado en la titulación del blanco.

Pm = Peso de la muestra de suelo.

El contenido de carbono fácilmente oxidable se convirtió en contenido de carbono orgánico total, mediante la relación propuesta por Walkley y Black (1934):

$$\% \text{COT} = \% \text{CFO} \times 1.32$$

Dónde:

%COT = porcentaje de carbono orgánico total.

%CFO = porcentaje de carbono fácilmente oxidable.

Para calcular el COS en t ha⁻¹ se utilizó la ecuación propuesta por González *et al.* (2008):

$$\text{COS (t ha}^{-1}\text{)} = \%C * (\text{Da} * 100) * P$$

Donde:

COS = Carbono orgánico del suelo

%C = Porcentaje de carbono

Da = Densidad aparente (g cm⁻³)

P = Profundidad de la capa de muestreo (m)

Densidad aparente (g cm⁻³)

Para obtener la densidad aparente del suelo se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso del suelo seco (g)}}{\text{Volumen del cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Los datos recolectados de campo y los datos obtenidos en gabinete se ordenaron en una hoja de cálculo de Excel 2013, luego se procesaron en el programa Infostat utilizando el ANOVA (Análisis de Varianza) para determinar si existe significación estadística, seguidamente se aplicó una prueba de rango múltiple de Tukey al 5% de probabilidad para determinar el mejor tratamiento con respecto al contenido de carbono en el suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque primario hasta los primeros 30 cm de profundidad.

El contenido de carbono orgánico en el suelo del bosque primario varía desde 37.22 t ha⁻¹ hasta 49.22 t ha⁻¹ concentradas en los primeros 30 cm de profundidad. En la mayoría de los bosques la acumulación de carbono orgánico normalmente es mayor en la primera capa del suelo debido a que en esta parte se da la descomposición de la hojarasca y demás restos vegetales y animales. Sin embargo, en el presente estudio se ha encontrado que entre los 20 – 30 cm de profundidad del suelo hay mayor contenido de carbono orgánico que en los primeros 20 cm de profundidad. Los factores que pueden causar la acumulación del carbono orgánico en el suelo en los niveles más profundos son la meso y macrofauna al transportar residuos orgánicos a través del perfil del suelo y la precipitación al causar el lavado de la materia orgánica de los horizontes superficiales. Además la densidad aparente del suelo es el factor más importante para estimar las reservas de carbono orgánico en el suelo y el principal responsable de las variaciones entre estimaciones.

Normalmente en los bosques primarios la gran heterogeneidad de las especies aportan hojarasca al suelo, la cual se descompone y forma la materia orgánica. Ésta mejora la porosidad y otras propiedades del suelo gracias a los coloides que contiene. La densidad aparente del bosque primario es baja (por ser menor a 1 g cm⁻³) (ver Tabla 17) lo que indica que la porosidad del suelo es alta, esto combinado con la alta precipitación de la zona puede haber causado que la materia orgánica acumulada en la parte superior se lixivie y almacene en niveles más profundos del suelo. Los suelos con alto contenido en carbono orgánico son las más afectadas por la variabilidad de la densidad aparente (Hiederer y Köchy 2011).

Morocho (2016) y Diekow *et al.* (2005) citado por Carvajal *et al.* (2009) también reportaron mayor acumulación de carbono en el suelo entre los 20 – 30 cm de profundidad.

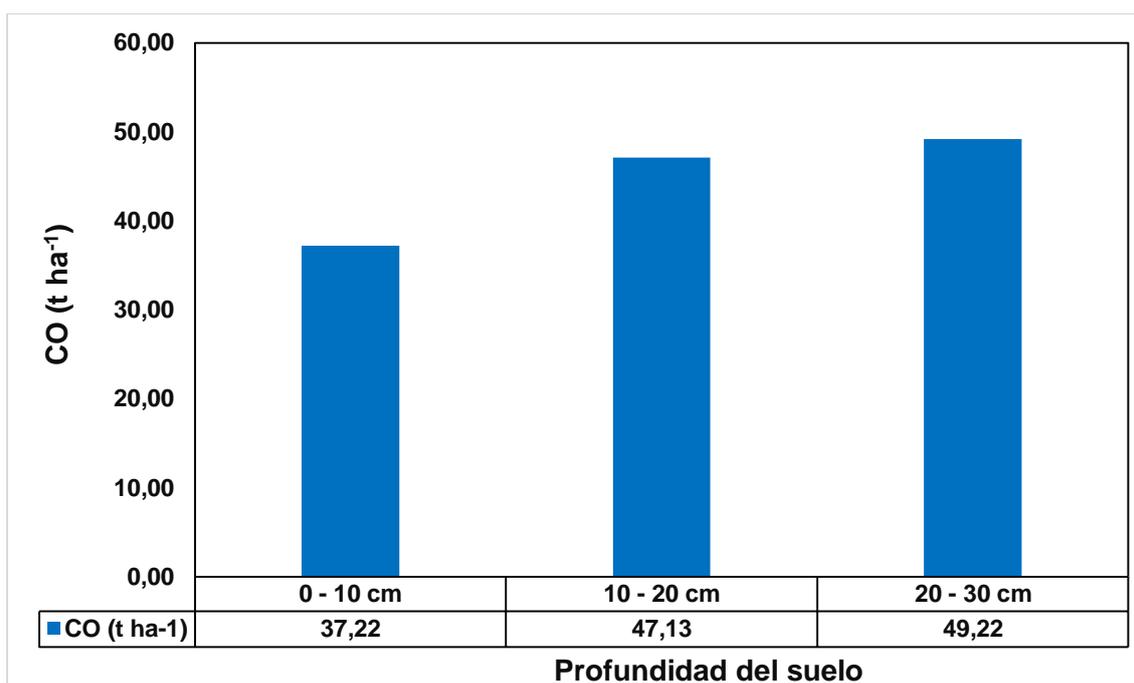


Figura 23. Carbono orgánico del suelo por niveles de profundidad en t ha⁻¹.

La densidad aparente del suelo del bosque primario (Figura 24) varía desde 0.50 g cm⁻³ hasta 0.85 g cm⁻³ y tiene una relación de aumentar conforme se penetra en el suelo, esto debido al peso del suelo de las capas superiores, lo cual genera más presión y hace que el suelo este más compactado. Por ello se ve que en la profundidad de 0 – 10 cm la densidad es menor que en las otras profundidades, ya que aquí no hay presión de otros horizontes, solo de los residuos orgánicos que hay sobre el suelo como la hojarasca, ramas secas, entre otros.

El valor de la densidad aparente en las tres profundidades es menor que 1 g cm⁻³ lo que indica de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y a Gonzáles (2015) que es un suelo orgánico y rico en materia orgánica.

Valores bajos de densidad aparente (<1 g cm⁻³) implican suelos porosos, bien aireados con buen drenaje y buena penetración de raíces (Donoso 1992, citado por Araucaria 2005). La densidad aparente depende de muchos factores como la textura, estructura y contenido de materia orgánica, así como del manejo del mismo (Rubio 2010).

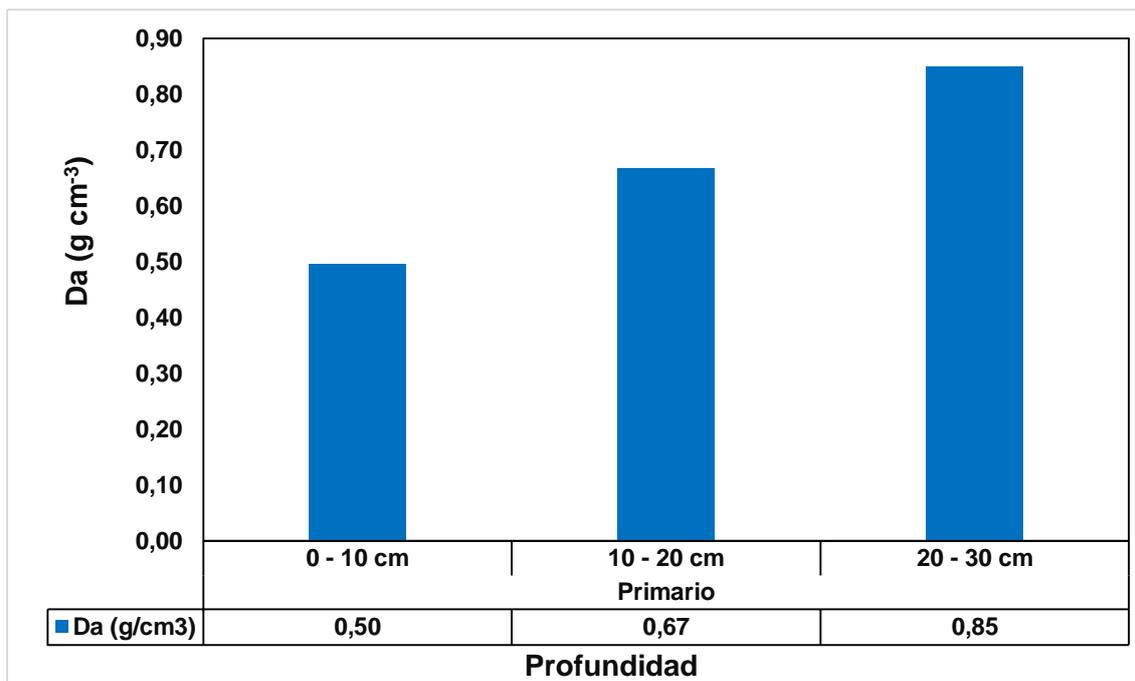


Figura 24. Densidad aparente por niveles de profundidad.

El color del suelo

En la Tabla 12 se indican los colores del suelo del bosque primario en las diferentes profundidades y parcelas de muestreo, tanto de las muestra húmedas como secas. Los colores de las muestras húmedas son más oscuras que los colores de las muestras en seco debido a que las muestras húmedas contienen agua y ésta capta más luminosidad. En cambio las muestras secas tienen los espacios llenos de aire, el cual no capta mucha luminosidad. La gran mayoría de muestras han sido de color marrón, tanto en húmedo como en seco, variando solamente la intensidad del color debido a la cantidad de carbono orgánico acumulado en la profundidad del suelo. El color del suelo se relaciona directamente con el contenido de carbono orgánico en el suelo, por ello los colores más oscuros indican que hay mayor acumulación de carbono orgánico que en suelos de colores claros. El suelo del bosque primario como se vio anteriormente acumula una gran cantidad de carbono en las diferentes profundidades de muestreo, por lo que coincide con los colores encontrados.

Tabla 12. Color del suelo del bosque primario.

Parcela	Prof. (cm)	Color	
		Muestra húmeda	Muestra seca
P1	0 - 10	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	10YR 4/3 Marrón
	10 - 20	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	10YR 4/3 Marrón
	20 - 30	10YR 5/2 Marrón grisáceo	10YR 5/4 Marrón amarillento
P2	0 - 10	10YR 3/3 Marrón oscuro	10YR 3/2 Marrón grisáceo muy oscuro
	10 - 20	10YR 3/1 Gris muy oscuro	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro
	20 - 30	10YR 3/1 Gris muy oscuro	10YR 6/2 Gris Marrón Claro
P3	0 - 10	10YR 3/4 Marrón	10YR 4/3 Marrón
	10 - 20	10YR 3/2 Marrón grisáceo muy oscuro	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro
	20 - 30	10YR 4/3 Marrón	10YR 5/4 Marrón amarillento

4.2. Contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque secundario hasta los primeros 30 cm de profundidad.

El contenido de carbono orgánico del suelo del bosque secundario varía desde 29.50 t ha⁻¹ hasta 39.23 t ha⁻¹. La distribución del carbono orgánico es descendente con la profundidad (Figura 25). El bosque secundario se ha formado a partir de la perturbación de un bosque primario, en ese proceso el carbono que se ha acumulado en el suelo del bosque primario se ha perdido ya sea por la erosión hídrica y eólica, lixiviación, por la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos, entre otros. Al formarse el bosque secundario nuevamente se ha ido incorporando hojarasca que al descomponerse ha formado la materia orgánica en la parte superficial del suelo y con el paso del tiempo ha ido penetrando en los horizontes inferiores.

Diversos autores coinciden en afirmar que en el bosque secundario la tendencia del carbono orgánico del suelo disminuye conforme se profundiza (Galicia *et al.* 2016, Alvarado 2013, Carvajal *et al.* 2009, Jordán 2006).

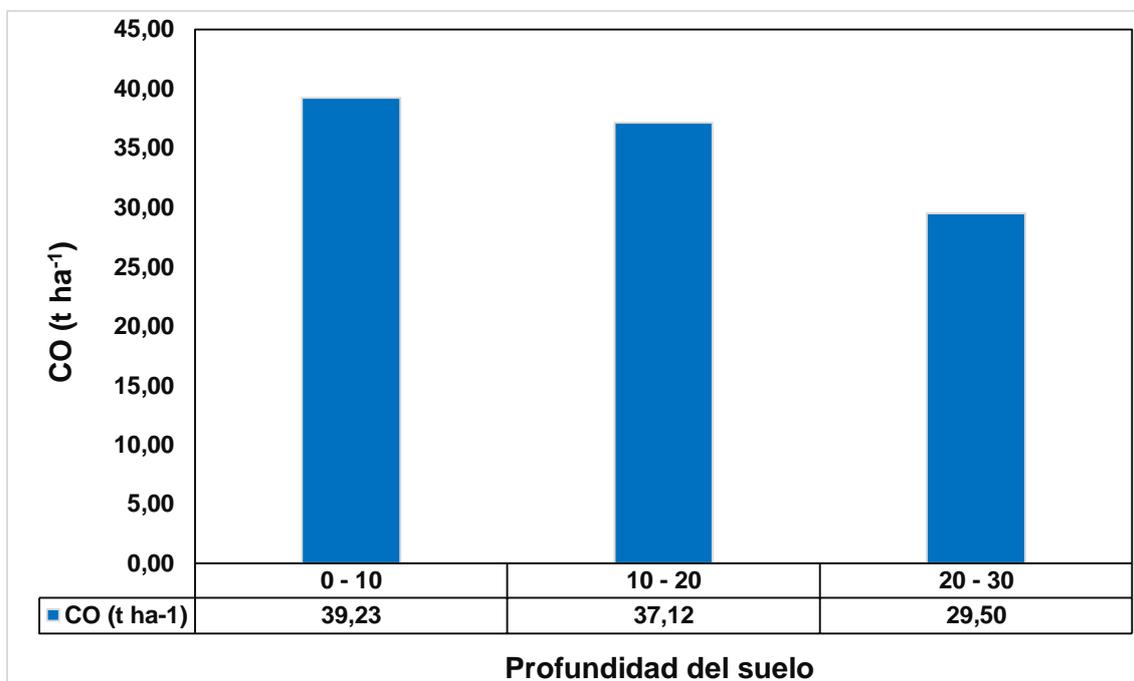


Figura 25. Carbono orgánico del suelo por niveles de profundidad en t ha⁻¹.

La densidad aparente del suelo del bosque secundario por niveles de profundidad (Figura 26) varía desde 0.55 g cm⁻³ hasta 0.88 g cm⁻³, incrementando conforme se profundiza en el suelo. Esto se debe como se mencionó antes por la compactación del suelo y peso de las capas más superficiales. En las tres profundidades de muestreo, el suelo del bosque primario tiene menor densidad aparente que el suelo del bosque secundario debido a la mayor cantidad de carbono orgánico que hay en este suelo.

Varios autores afirman que la densidad aparente es mayor a más profundidad del suelo (Alvarado y Forsythe 2005; Alvarado 2013; Pinzón y Amézquita 1991; Gonzáles *et al.* s.f.; Dercourt y Paquet 1984) debido a que el suelo en los horizontes más profundos está más compactado. Además Salamanca y Sadeghian (2005) afirman que la densidad aparente del suelo se incrementa a medida que se profundiza en el suelo debido al material de origen, el contenido de materia orgánica, la humedad de campo y la clase textural.

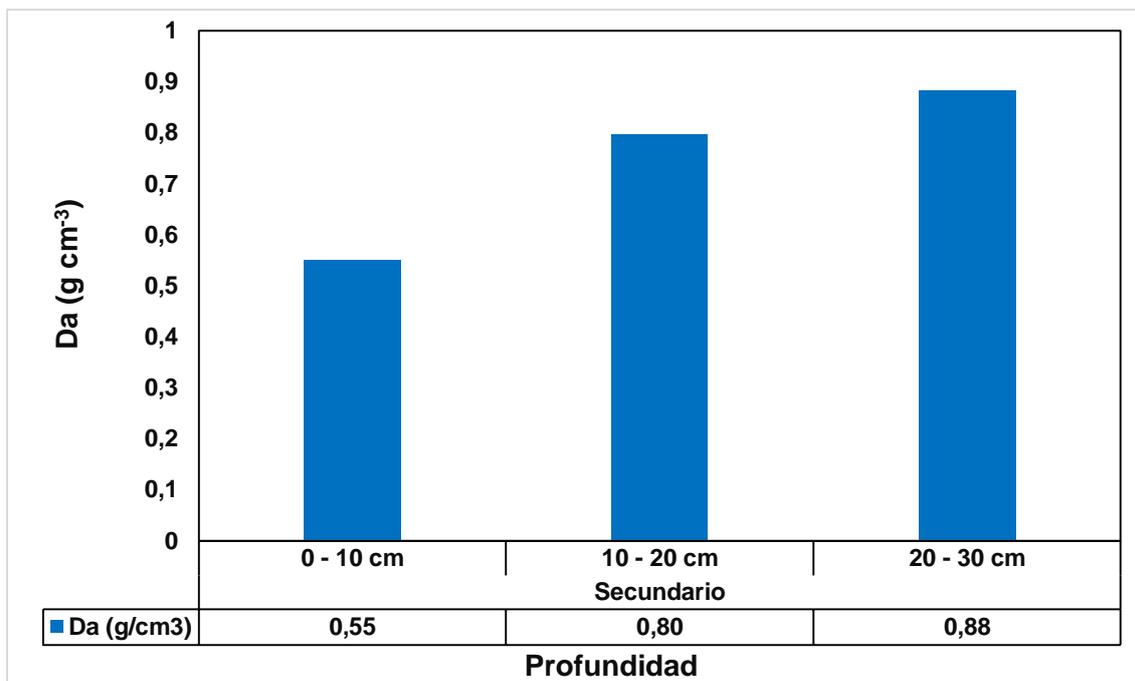


Figura 26. Densidad aparente por niveles de profundidad.

El color del suelo

En la Tabla 13 se indican los colores obtenidos en las tres profundidades y tres parcelas de muestreo del suelo del bosque secundario, tanto de las muestras húmedas como secas. Los colores de las muestras obtenidos en este bosque son marrones pero más claros que los del bosque primario, debido a la menor cantidad de carbono orgánico acumulado en estos suelos. En los primeros 10 cm del suelo se encuentran los colores más oscuros, mientras que cuanto más se profundiza en el suelo los colores son más claros debido a la disminución del contenido de materia orgánica.

El color fue determinado en muestras húmedas y secas debido a que una muestra húmeda absorbe más cantidad de radiación que una muestra seca (Nieto 2012); esto queda demostrado ya que todas las muestras humedecidas tienen colores más oscuros que las muestras secas. De acuerdo a Herrera (1998) los componentes orgánicos presentan una coloración marrón, gris o negra coincidiendo con los colores encontrados en el suelo del bosque primario y secundario. Cuanto más oscuro es el suelo es más rico en materia orgánica (Gago 2017; Jordan 2006).

Tabla 13. Color del suelo del bosque secundario.

Parcela	Prof. (cm)	Color	
		Muestra húmeda	Muestra seca
P1	0 - 10	10YR 5/2 Marrón grisáceo	10YR 6/3 Marrón pálido
	10 - 20	10YR 5/4 Marrón amarillento	10YR 6/3 Marrón pálido
	20 - 30	10YR 5/4 Marrón amarillento	10YR 7/3 Marrón muy pálido
P2	0 - 10	10YR 4/3 Marrón	10YR 5/4 Marrón amarillento
	10 - 20	10YR 5/2 Marrón grisáceo	10YR 6/2 Gris Marrón Claro
	20 - 30	10YR 5/6 Marrón amarillento	10YR 6/3 Marrón pálido
P3	0 - 10	10YR 3/3 Marrón oscuro	10YR 5/4 Marrón amarillento
	10 - 20	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	10YR 6/3 Marrón pálido
	20 - 30	10YR 5/4 Marrón amarillento	10YR 6/3 Marrón pálido

4.3. Comparación del contenido de carbono orgánico del suelo del bosque primario y secundario.

El suelo del bosque primario acumula mayor cantidad de carbono orgánico con 133.57 t ha^{-1} que el suelo del bosque secundario que acumula 105.86 t ha^{-1} (Tabla 14). La diferencia es porque el bosque primario está bien conservado y sus hojas aportan cantidades importantes de carbono orgánico al suelo; además este bosque tiene más edad que el bosque secundario, lo cual ha generado que con el paso de los años la incorporación de residuos orgánicos al suelo sea mayor, estos residuos al descomponerse han generado carbono orgánico, el cual se ha ido acumulando en el suelo. En cambio el bosque secundario al ser más joven y tener menor diversidad de especies incorpora menos residuos orgánicos en el suelo para que formen carbono orgánico. La acumulación del carbono orgánico en el suelo depende de muchos factores como la precipitación del lugar, la topografía, la densidad aparente del suelo, la diversidad de especies, entre otros.

Al respecto Norberto (2006) y Acosta *et al.* (2001) afirman que los ecosistemas que almacenan más carbono en la biomasa vegetal son los de mayor edad,

puesto que suelen preservar individuos mayores y más robustos, también la densidad y la mezcla de especies, lo cual es el caso de los bosques primarios, y esto se ve reflejado en los resultados obtenidos, donde el bosque primario tiene mayor contenido de carbono en el suelo que el bosque secundario. Arévalo *et al.* (2003) mencionan que la cantidad de carbono orgánico almacenado está en función de la heterogeneidad del bosque y está determinado por las condiciones del suelo y clima, ya que existen plantas con diversos diámetros, edades y una variedad de especies.

El contenido de carbono orgánico total en el suelo del bosque primario y secundario hasta los 30 cm de profundidad es calificado como “Alto”, ya que según Vela *et al.* (2009) se encuentra dentro del rango de 100 - 150 t ha⁻¹. Los resultados están dentro del rango reportado por Kanninen (2003) quien afirma que en los trópicos, el carbono orgánico que está en sumideros superficiales varía entre 60 y 230 t ha⁻¹ en bosques primarios, y entre 25 y 190 t ha⁻¹ en bosques secundarios.

Cabe mencionar que en este trabajo sólo se hace referencia al carbono orgánico que se encuentra en el suelo, a una profundidad de 0 a 30 cm, que se considera es la parte del suelo más sensible por los cambios de uso de suelo y de manejo antrópico. También es importante recalcar que estos datos deben considerarse como una aproximación sobre el carbono orgánico del suelo debido a la complejidad de la cubierta vegetal y la heterogeneidad del sistema edáfico.

Tabla 14. Carbono orgánico total por tipo de bosque.

Tipo de bosque	Profundidad (cm)	Carbono orgánico promedio (t ha⁻¹)	Carbono orgánico total (t ha⁻¹)
Bosque primario	0 - 10	37.22	133.57
	10 - 20	47.13	
	20 - 30	49.22	
Bosque secundario	0 - 10	39.23	105.86
	10 - 20	37.12	
	20 - 30	29.50	

Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de carbono orgánico

En la Tabla 15 se observa los resultados de una varianza (ANOVA) para el carbono orgánico, los cuales indican que existe alta significación estadística para el bosque y la profundidad, dado que el F calculado es superior a las F tabulares a las probabilidades del 5 % y 1 %, respectivamente. Esto indica que en los bosques evaluados el porcentaje de carbono orgánico es significativamente diferente, de igual manera para la profundidad, es decir, que el carbono orgánico obtenido en las diferentes profundidades es significativamente diferente.

Para la interacción del bosque por la profundidad (B*P), se encontró alta significación estadística, dado que el valor del F calculado es superior al F tabular a las probabilidades del 5 % y 1 %, respectivamente. Esto indica que el porcentaje de carbono orgánico obtenido, está afectado por el tipo de bosque y por la profundidad, es decir, que estos dos factores influyen de forma conjunta en los resultados.

El coeficiente de variación (CV = 3.05 %), indica la variabilidad de los resultados para el porcentaje de carbono orgánico, es decir, que se encontró diferentes resultados en las repeticiones de cada tratamiento (combinación de los factores). El CV por ser bajo, indica que los resultados no están muy dispersos y son homogéneos a la media.

Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de carbono orgánico.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	F tabular	
					5%	1%
Repeticiones	0.002	2	0.001	0.2 ns	4.1	7.56
Bosque (B)	0.660	1	0.660	122.43 **	4.97	10.04
Profundidad (P)	1.040	2	0.520	96.31 **	4.1	7.56
B*P	0.230	2	0.110	21.29 **	4.1	7.56
Error	0.050	10	0.010			
Total	1.980	17				

No significativo (ns), altamente significativo (**)

$$CV = 3.05 \%$$

Al realizar la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad (Tabla 16) para el efecto de la interacción de los factores (bosque por profundidad), se observa que el porcentaje de carbono orgánico obtenido en el bosque primario entre los 0 - 10 cm y 10 - 20 cm, y en el bosque secundario entre los 0 - 10 cm son estadísticamente iguales y superiores al resto y están en el grupo A; mientras que el resto de los resultados en las demás profundidades son clasificadas en distintos grupos por ser estadísticamente diferentes. Los menores porcentajes de carbono se encuentran entre los 10 - 30 cm de profundidad del suelo del bosque secundario.

Tabla 16. Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad, para la interacción de los factores bosque por profundidad (B*P), para el porcentaje de carbono orgánico.

Bosque	Profundidad (cm)	Carbono orgánico (%)	Agrupación por Tukey al 5%
Primario	0 - 10	7.49	A
Secundario	0 - 10	7.13	A
Primario	10 - 20	7.07	A
Primario	20 - 30	5.79	B
Secundario	10 - 20	4.66	C
Secundario	20 - 30	3.34	D

La Figura 27 muestra la interacción de los niveles de cada factor, y se observa que el carbono orgánico disminuye conforme aumenta la profundidad del suelo. En el bosque primario el carbono orgánico varía desde 5.79 % hasta 7.49 %, mientras que en el bosque secundario éste varía desde 3.34 % hasta 7.13 %. Estos resultados evidencian que a mayor profundidad se encuentra menor porcentaje de carbono orgánico. También se puede observar que en el suelo del bosque primario los porcentajes de carbono son mayores en las tres profundidades de muestreo.

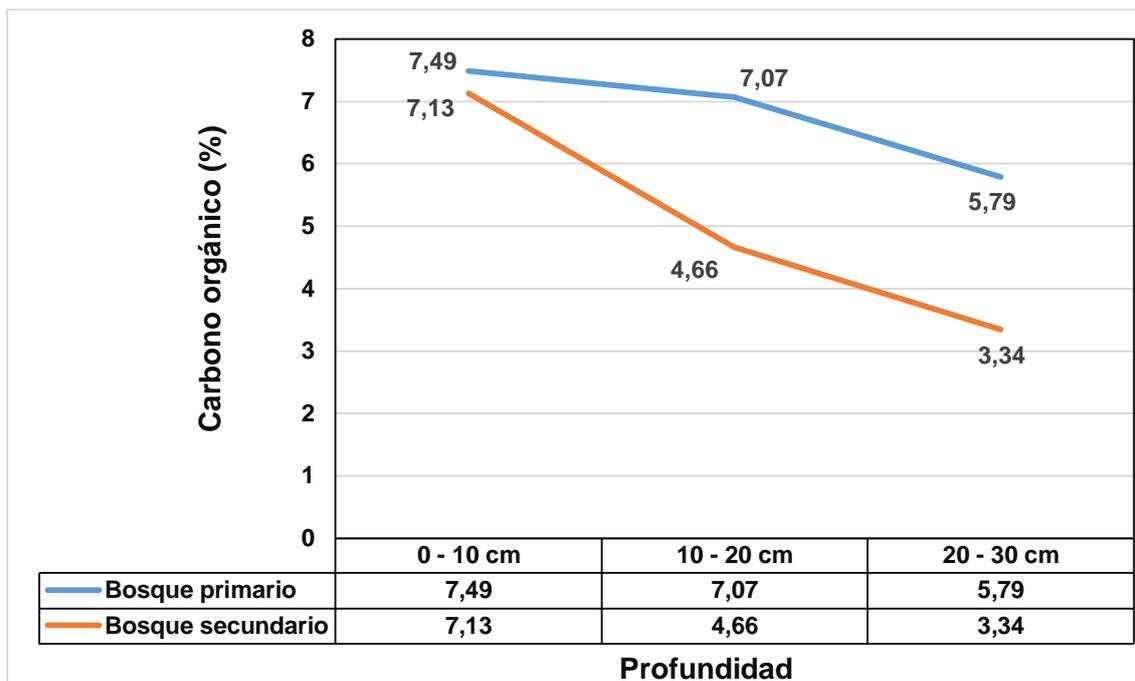


Figura 27. Interacción de los niveles de los factores (bosque por profundidad) para el porcentaje de carbono orgánico en el bosque primario y secundario.

Densidad aparente

En la Tabla 17 se muestra la densidad aparente promedio por tipo de bosque, encontrándose que el bosque primario tiene menor densidad aparente (0.67 g cm^{-3}) que el bosque secundario (0.74 g cm^{-3}). Estas diferencias se deben a que el bosque primario tiene acumulado mayor cantidad de carbono orgánico que el bosque secundario.

La densidad aparente es menor en el suelo del bosque primario indicando una mayor cantidad de espacio poroso (Ramírez 1997), y la mayor densidad aparente del bosque secundario indica que en el suelo hay mayor compactación. Los dos tipos de bosques evaluados tienen densidad aparente menor a 1 g cm^{-3} por lo que son considerados suelos ricos en materia orgánica.

Tabla 17. Densidad aparente por tipo de bosque (g cm^{-3}).

Tipo de bosque	Densidad promedio (g cm^{-3})	Carbono orgánico total (t ha^{-1})
Bosque primario	0.67	133.57
Bosque secundario	0.74	105.86

Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente

En Tabla 18 se observa los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente, los cuales indican que no existe significación estadística para el factor bosque y para la interacción de los factores (B*P), dado que el F calculado es menor a las F tabulares a las probabilidades del 5 % y 1 %, respectivamente. Esto indica que los resultados de la densidad aparente, se debe a la influencia de cada factor de forma independiente.

Para la profundidad se encontró alta significación estadística, dado que el F calculado es superior a las F tabulares a la probabilidades del 5 % y 1 %, respectivamente, esto quiere decir, que la densidad aparente obtenida en cada profundidad fueron significativamente diferentes.

El coeficiente de variación ($\text{CV} = 11.75\%$), indica la variabilidad de los resultados para la densidad aparente, es decir, que se encontró diferentes resultados en las repeticiones de cada tratamiento (combinación de los factores). El CV indica que los resultados no están muy dispersos o alejados de la media.

Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	F tabular	
					5%	1%
Repeticiones	0.0017	2	0.0008	0.12 ns	4.1	7.56
Bosque (B)	0.0200	1	0.0200	3.41 ns	4.97	10
Profundidad (P)	0.3600	2	0.1800	26.1 **	4.1	7.56
B*P	0.0100	2	0.0039	0.57 ns	4.1	7.56
Error	0.0700	10	0.0100			
Total	0.4600	17				

No significativo (ns), altamente significativo (**)

$$CV = 11.75 \%$$

Al realizar la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad (Tabla 19) para la profundidad, se observa que los resultados de la densidad aparente son estadísticamente diferentes. Hallándose entre los 20 - 30 cm el mayor resultado de la densidad, seguido de la profundidad entre 10 - 20 cm y el resultado inferior se encuentra en la primera profundidad entre 0 - 10 cm.

Tabla 19. Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad, para la profundidad.

Profundidad (cm)	Densidad aparente	Agrupación por Tukey al 5 %
20 - 30	0.87	A
10 - 20	0.73	B
0 - 10	0.52	C

En la Figura 28 se observa que la densidad aparente aumenta conforme se profundiza en el suelo, también se puede ver que los valores de la densidad son menores en el suelo del bosque primario que los del bosque secundario debido a la mayor acumulación de carbono. Estos resultados evidencian que a mayor profundidad se encuentra mayores resultados en la densidad aparente por la presión de las capas superiores del suelo.

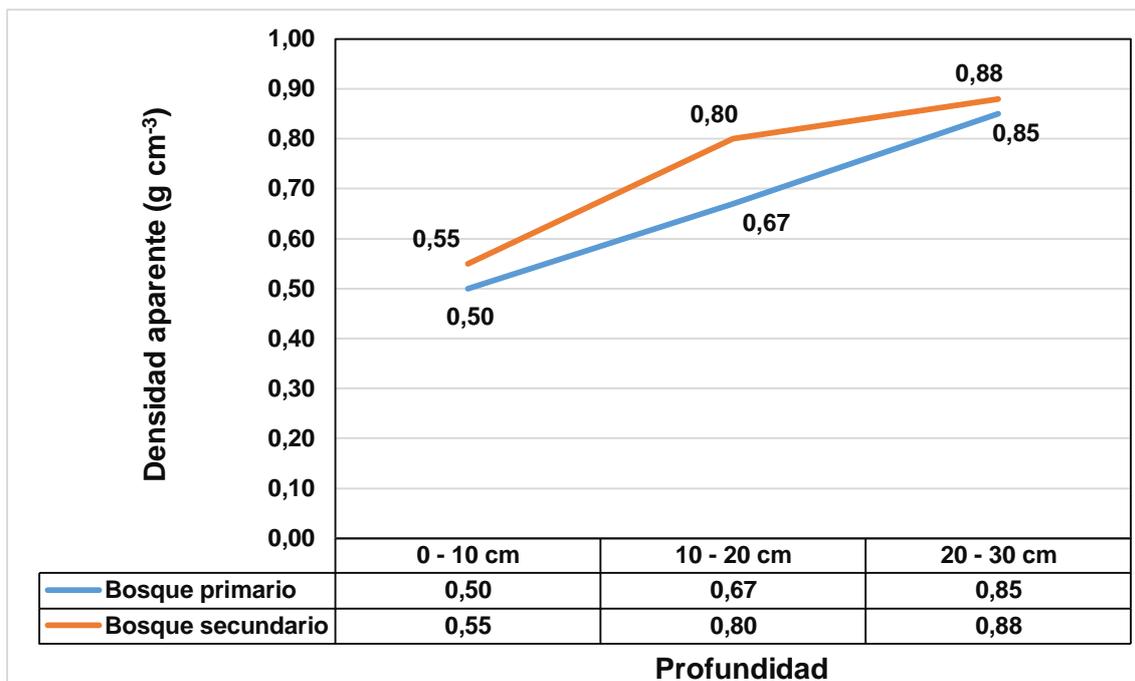


Figura 28. Interacción de los niveles de los factores (bosque por profundidad) para la densidad aparente.

Materia orgánica del suelo

El carbono orgánico es el principal elemento que forma parte de la materia orgánica, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro. Los métodos analíticos determinan carbono órgano a partir del cual se estima la materia orgánica, multiplicando COS por el factor de Van Benmelen equivalente a 1.724. Este factor resulta de la premisa que dice que el 58% de la materia orgánica es carbono orgánico.

A pesar del pequeño porcentaje que representa la materia orgánica en el suelo (5% del volumen de un suelo ideal) es de gran importancia para el crecimiento de las plantas. Además mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

En el presente estudio se ha hecho el cálculo de la materia orgánica dando como resultado promedio 11.70 % (230.16 t ha⁻¹) para el bosque primario y 5.04 % (181.80 t ha⁻¹) para el bosque secundario (Tabla 20).

El contenido de materia orgánica del suelo del bosque primario es clasificada como “muy alta” por ser > a 6%, y la materia orgánica del suelo del bosque secundario es clasificada como “alta” porque se encuentra entre 3.6 – 6.0 % (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Tabla 20. Materia orgánica por tipo de bosque.

Bosque	Carbono orgánico (t ha⁻¹)	Materia orgánica (%)	Materia orgánica (t ha⁻¹)
Primario	133.57	11.70	230.27
Secundario	105.86	5.04	182.50

Captura de CO₂

El gas de efecto invernadero que más incide sobre el calentamiento de la atmósfera es el dióxido de carbono (CO₂). Este es un gas natural que, debido a la quema de combustibles fósiles, la industrialización y la deforestación, se ha concentrado de manera excesiva en las últimas décadas. El CO₂ es absorbido por los bosques y almacenado en la biomasa, ésta al descomponerse permite el almacenamiento del carbono en el suelo. A partir del carbono orgánico se puede inferir cuanto de CO₂ ha capturado el bosque.

En la Tabla 21 se muestra parte del CO₂ absorbido por tipo de bosque, ya que solo estamos infiriendo el CO₂ con el contenido de carbono orgánico del suelo. Se observa que el bosque primario es el que más cantidad de CO₂ ha absorbido. Cabe resaltar que en esta investigación solo se ha analizado el carbono del suelo, pero también hay almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, biomasa debajo del suelo y en la hojarasca. Por tal motivo el CO₂ que se ha estimado es una parte de lo que el bosque ha absorbido, pues si se tuviera el carbono orgánico total del bosque este resultado sería mucho mayor.

Tabla 21. CO₂ absorbido promedio por tipo de bosque (en el suelo).

Tipo de bosque	Carbono orgánico (t ha⁻¹)	CO₂ capturado (t ha⁻¹)
Primario	133.57	489.95
Secundario	105.86	387.01

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ El contenido de carbono orgánico del suelo en el bosque primario entre los 0 - 10 cm fue de 37.22 t ha⁻¹, entre los 10 - 20 cm 47.13 t ha⁻¹ y entre los 20 - 30 cm 49.22 t ha⁻¹. El contenido de carbono orgánico total en los primeros 30 cm de suelo fue de 133.57 t ha⁻¹.
- ✓ El contenido de carbono orgánico del suelo en el bosque secundario entre los 0 - 10 cm fue de 39.23 t ha⁻¹, entre los 10 - 20 cm 37.12 t ha⁻¹ y entre los 20 - 30 cm 29.50 t ha⁻¹. El contenido de carbono orgánico total en los primeros 30 cm de suelo fue de 105.86 t ha⁻¹.
- ✓ El bosque con mayor contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo hasta los 30 cm de profundidad es el bosque primario; ya que almacena 133.57 t C ha⁻¹, mientras que el bosque secundario solo llega hasta los 105.86 t C ha⁻¹; superando el bosque primario con 27.71 t ha⁻¹ de carbono orgánico al bosque secundario.

Se recomienda realizar estudios donde se determine el contenido de carbono orgánico total del bosque, lo cual implica determinar el contenido de carbono del suelo, de la biomasa aérea, de la biomasa subterránea, de la hojarasca y de los árboles muertos en pie.

Realizar estudios donde la profundidad de muestreo sea mayor a los 30 cm; ya que se ha observado que hasta los 30 cm existe altos % de carbono orgánico.

VI. LITERATURA CITADA

- Acosta, M; Quednow, K; Etchevers, J; Monreal, C. 2001. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. INFAP. Colegio de Postgraduados, México. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile.
- Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1): 85-94. ISSN:0377-9424 / 2005
- Alvarado, J; Andrade, HJ; Segura, M. 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) En el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal* 16(1): 21 - 31
- Andrade Castañeda, HJ; Segura Madrigal, MA; Rojas Patiño, AS. 2016. Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Revista Agronomica Mesoamericana*. 27(2): 233-241.
- Andrade Cevallos, R; Guncay, F; Ibarra, M. 2013. Determinación de la densidad aparente por el método del hoyo. Escuela Politécnica del Ejército. Santo Domingo.
- Andrade, R. 2013. Determinación del contenido de materia orgánica. Santo Domingo.
- Ángeles Fragoso, C; Hernandez Abreu, JD; Moises Ochoa, A; Morales Molina, AK. 2010. Determinación de la densidad aparente del suelo. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

- Araucaria. 2005. Densidad aparente. (en línea). Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <http://araucarias.blogspot.com/2005/09/densidad-aparente.html>
- Arévalo, L; Alegre, J; Palm, C. 2003. Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24 pp.
- Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil and Tillage Research*, 49, 159-170.
- BioPlanet. s.f. Qué son los bonos de carbono. (en línea). Consultado 28 abr. 2019. Disponible en <https://paris2015cop21.org/que-son-bonos-carbono/>
- Boletín Agrario. s.f. Materia orgánica. (en línea). Consultado 13 mar. 2019. Disponible en <https://boletinagrario.com/ap-6,materia+organica,4951.html>
- Burgos, D; Cerda, A; Cueto, J. 2012. Determinación de Carbono Total y Carbono Orgánico en diferentes suelos utilizando metodo Combustión seca.
- Bush, P; Karcovic, A; Gonzáles, V; Bonilla, C. s.f. Secuestro de carbono en el suelo: cuantificación del potencial de captura en el suelo de un bosque patagónico. (en línea). Santiago de Chile, CL. 42-47 p.
- Carvajal, A; Feijoo, A; Quintero, H; Rondón, M. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Revista Ciencia del Suelo y Nutrición*. 9(3): 222-235.

Castillo Pacheco, LA; Bojórquez Serrano, JI; Hernández Jiménez, A; García Paredes, D. 2016. Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. *Cultivos Tropicales*. 37(3). México.

CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, ES). 2001. Determinación del contenido de materia orgánica en los suelos con agua oxigenada. (en línea). Madrid, ES. Consultado 12 feb. 2019. Disponible en http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/verdes/1972/117_72.pdf

Chávez, J. 2015. Perú: Bonos de Carbono como palanca de la Inversión Privada. (en línea). Consultado 20 feb. 2019. Disponible en <http://alertaeconomica.com/peru-bonos-de-carbono-como-palanca-de-la-inversion-privada/>

Cifuentes, M; Jobse, J; Watson, V. s.f. Determinación de carbono total en suelos de diferentes tipos de uso de tierra a lo largo de una gradiente climática en Costa Rica. (en línea). CR. Consultado 11 ene. 2019. Disponible en <http://www.una.ac.cr/inis/docs/suelos/VicWat.pdf>

Congreso Venezolano de Compostaje (1), Taller sobre normalización para la evaluación de abonos orgánicos y mejoradores de suelo (5, 2014, San Cristóbal, VE). 2014. Método paso a paso para determinación de carbono orgánico en abonos orgánicos. Método de combustión húmeda (Walkley y Black Modificado). Ed. Arrieché, IE. San Cristóbal, Venezuela. 20 p.

Crosara, A. sf. Color del suelo. (en línea). Consultado 09 jul. 2019. Disponible en <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%202.pdf>

- Cuéllar Bautista, JE; Salazar Hinojosa, EJ; Fernández Ruiz, KR. s.f. Efecto del cambio de uso del bosque tropical sobre carbono total almacenado, cuenca de Aguaytía, Perú. *Revista Forestal del Perú*. 27 1(2) 8-26
- Dercourt, J; Paquet, J. 1984. *Fundamentos de Geología*. Editorial Reverté. Paris. 423 p.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). "NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio muestreo y análisis". 23 de abril de 2003, 2002, 85 p.
- Domínguez, J; Román, A; Prieto, F; Acevedo, O. 2012. Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 3 (1): 7-15.
- EcuRed. 2016. Mineralización. (en línea). EC. Consultado 12 ene. 2019. Disponible en <https://www.ecured.cu/index.php?title=Especial:Citar&page=Mineralizaci%C3%B3n&id=2640705>
- EcuRed. 2018. Bosque primario (nativo). (en línea). EC. Consultado 12 ene. 2019. Disponible en https://www.ecured.cu/index.php?title=Especial:Citar&page=Bosque_Primary_%28Nativo%29&id=3044239
- El Perfil del Suelo y sus Horizontes. 2015. (en línea). Consultado 14 ene. 2019. Disponible en <https://elindioyrevolucion.wordpress.com/2008/01/09/el-perfil-del-suelo-y-sus-horizontes/>
- Espinoza, J. 2015. Color del suelo. (en línea). Consultado 22 de ene. 2019. Disponible en http://www.academia.edu/12190932/COLOR_DEL_SUELO_Curso_de_Edafolog%C3%ADa

Eyherabide, M; Saínz, H; Barbieri, P; Echeverría, H. 2014. Comparación de métodos para determinar Carbono orgánico en el suelo. *Ciencia de suelo* 32(1): 13-19.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). s.f. REDD+ Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques. (en línea). Consultado 01 ago. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/redd/es/>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 1996. El suelo. (en línea). Consultado 23 jun. 2019. Disponible en http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm#P5_56

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2000. Directrices para la evaluación en los países tropicales. Volumen y biomasa. (en línea). Roma, IT. Consultado 05 de feb. 2019. Disponible en http://www.fao.org/documents/advanced_s_result.asp?QueryString=

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. (en línea). Roma, IT. Consultado 05 de feb. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2003. Secuestro de carbono en bosques, su papel en el ciclo global. (en línea). Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/Y4435S/y4435s09.htm#bm9>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2005. Evaluación de recursos forestales mundiales. Estudio FAO Montes. 147 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2010. Las posibilidades de financiación del carbono para la Agricultura, la actividad Forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Roma, IT. 3-4 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2016. Pérdida de carbono orgánico del suelo (COS). (en línea). Roma, IT. Consultado 15 feb. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i6472s.pdf>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2017. Carbono Órgánico del Suelo: el potencial oculto. (en línea). Roma, IT. Consultado 15 feb. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/b-i6937s.pdf>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2017. Mapa de carbono orgánico del suelo. Roma, IT.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2017. Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo. Simposio internacional sobre el carbono orgánico del suelo 21-23 marzo 2017 | sede de la FAO - Roma, Italia.

FAO y GTIS (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, IT). 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) - Resumen técnico. Roma, IT.

Flores, L; Alcalá, J. 2010. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de Suelos. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Edafología. 56 p.

- Fundación Aquae. 2011. Los bosques, sumideros naturales de CO₂. (en línea). Consultado 05 mar. 2019. Disponible en <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sostenibilidad/los-bosques-sumideros-naturales-de-co2/>
- Gago, M. 2017. El color del suelo y su pH. (en línea). Consultado 05 ago. 2019. Disponible en <https://www.ecologiaverde.com/el-color-del-suelo-y-su-ph-682.html>
- Galicia, L; Gamboa Cáceres, AM; Cram, S; Chavez Vergara, B; Peña Ramírez, V; Saynes, V; Siebe, C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de Mexico. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- Gallardo, J. 2001. Mineralización humificación de la materia orgánica del suelo: Consecuencias sobre la contaminación. Uso de Microorganismos en la agricultura -materia orgánica del suelo: Mito o Realidad. Medellín, CO. 142-153 p.
- Gamarra, J. 2001. Estimación del contenido de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* LABILL, en Junín, Perú. 21 p.
- García, R. 2001. Combustión y Combustibles. (en línea). Consultado 25 feb. 2018. Disponible en https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/13-01-23_Jornada%20calderas%20industriales/01-Conceptos-de-combustion-y-combustibles-GAS-NATURAL-SDG-fenercom-2013
- Godoy, MN. 2008. Mecanismos del Protocolo de Kioto: desarrollo y oportunidades para Argentina. Programa de formación 2008. Bolsa de comercio de Rosario. (en línea). Consultados 25 feb. 2019. Disponible en <http://www.capacitacion.bcr.com.ar/Documentos/EdicionesBCR/13/NataliaGodoy%20MecanismoPKenero.pdf>

- Gonzales Hernández, F; López Arias, M; Minaya Gallego, MT. sf. La conductividad hidráulica de los suelos como función del contenido y de la tensión hídrica. Instituto Nacional De Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 28040 Madrid
- González Lara, O. 2015. Determinacion de la densidad aparente del suelo. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Juan Acateno, Teziutlán, Mexico. 12p.
- Gonzales Molina, L; Etchevers Barra, JD; Hidalgo Moreno, C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42(7). 741 – 751 p.
- Herrera Cáceres, A. 2017. Color del suelo. (en linea). Consultado 09 jul. 2019. Disponible en <https://www.studocu.com/es/document/universidad-de-cordoba-espana/edafologia/apuntes/apuntes-tema-8-color-del-suelo/1397489/view>
- Hiederer, R; Köchy, M. 2011. Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database. Luxembourg: JRC-IES.
- Honorio Coronado, EN; Baker, TR. 2010. Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds. Lima, 54p.
- Huamán Jiménez, AO. 2014. Eficiencia de captura de carbono en el sotobosque, hojarasca y suelo del bosque de neblina del caserío Miraflores, San Ignacio, Perú. Tesis. Universidad Alas Peruanas.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. 45. 27-39.

ICGC (Instituto Cartográfico y Geográfico de Catalunya, ES). 2018. Concepto de suelo. (en línea). Consultado 23 feb. 2019. Disponible en <http://www.icgc.cat/es/Ciudadano/Informate/Recursos-geologicos/Suelos/Concepto-de-suelo>

Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Medellín, Antioquia, CO. 619p.

Jiménes, P; Hernández, S. s.f. Agrotecnología. (en línea). Consultado 25 feb. 2019. Disponible en http://servicios.educarm.es/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/suelos_tema_1.pdf

Jordán, A. 2006. Manual de edafología. Sevilla, ES. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. 143 p.

Kanninen, M. 2003. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. CATIE, Turrialba, Costa Rica. (en línea). Consultado 15 set. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/Y4435S/y4435s09.htm#bm9>

Khan Academy. 2015. ciclo del carbono. (en línea). consultado 25 feb. 2019. disponible en <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-carbon-cycle>

Lal, R. 2015. Forest Soils and Carbon Sequestration. Forest Ecology and Management, 220: 242- 258.

LENNTECH. 2015. Carbono. (en línea). Consultado 22 feb. 2019. Disponible en <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/c.htm>

- López, RM. 2017. Valoración de carbono en la necromasa y suelo del bosque protector de Aguarongo, provincia de Azuay, Ecuador. Tesis Lic. Sc. Universidad Politécnica Salesiana – sede Cuenca. 70 p.
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador). 2012. Manual de campo del proyecto Evaluación Nacional Forestal. Ecuador.
- Martínez, E; Fuentes, JP; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8(1): 68-96.
- Martínez, JM; Duval, M; López, F; Iglesias, J; Galantini, J. 2017. Ajustes en la estimación de carbono orgánico por el método de calcinación en molisoles del sudoeste bonaerense. Biblioteca Científica Electrónica en Línea, 35 (1).
- Materia orgánica del suelo. s.f. (en línea). Consultado 01 ago. 2019. Disponible en <http://www.edafologia.net/introeda/tema02/prop.htm>
- Mendoza, R; Espinoza, A. 2017. Guía técnica para muestreo de suelos. 1 ed. 56 p.
- Mercado, G. 2017. Carbono y sus componentes. (en línea). Consultado 13 feb. 2019. Disponible en <https://es.scribd.com/document/343441502/Carbono-y-Sus-Compuestos>
- MINAM (Ministerio del Ambiente, PE). 2013. REDD y REDD+: iniciativas para reducir las emisiones de carbono derivadas de la deforestación y degradación de los bosques.
- MINAM (Ministerio del Ambiente, PE). REDD y REDD+: iniciativas para reducir las emisiones de carbono. (en línea). Consultado el 01 ago. 2019. Disponible en <http://www.minam.gob.pe/prensa/dialogos-ambientales/redd-y-redd-iniciativas-para-reducir-las-emisiones-de-carbono/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. REDD +. (en línea). Consultado 15 feb. 2019. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/472-plantilla-cambio-climatico-28>

Morocho, V. 2017. Evaluación del contenido de carbono en el suelo de un sistema de pastoreo y bosque nativo de la reserva Huayrapalte, Cantón Suscal, Provincia de Cañar. Tesis lic. Ing. Forestal. Riobamba, EC. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo. 69 p.

Moura, P. 2001. La convención sobre el clima y el mercado de las contrapartes de las emisiones de carbono basadas en las actividades forestales. *Unasylva*, 52(206): 34 - 40.

Neurtek Instruments (Equipos de medición para control de calidad). Cartas de color Munsell. Rev. 2. N° 954138.

Nieto, S. 2012. Color del suelo. (en línea). Consultado 25 jun. 2019. Disponible en <https://prezi.com/-ihbctkpyqaq/color-del-suelo/>

Norberto, C. 2006. Metodologías para el Análisis costo-beneficio de usos del suelo y fijación de carbono en sistemas forestales para el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Proyecto Forestal de Desarrollo (SAGPyA/BIRF). Buenos Aires, Argentina. 20 pp.

Oñate, M. (2008). Fundamentos de Geología y Edafología. Riobamba – Ecuador: Politécnica.

Ordoñez, JA; de Jong, B. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michuacán. 7(2): 27 - 47.

Orrego, SA; del Valle, JI. 2001. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios y secundarios de Colombia. 31 p.

- Pino, F. 2015. Características del carbono. (en línea). Consultado 30 ene. 2019. Disponible en <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4360/caracteristicas-del-carbono>
- Pinzón, A.; Amézquita, E. (1991). Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas tropicales*, 13(2), 21-26.
- Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático. 2017. ABC de los bosques peruanos. (en línea). Consultado el 5 de mar. 2019. Disponible en <http://www.bosques.gob.pe/peru-pais-de-bosques>
- Ramírez, R. 1997. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Revista electrónica de divulgación científica forestal. s.f. Glosario. (en línea). Consultado 16 set. 2019. Disponible en https://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?page_id=436
- Rubio Gutiérrez, AM. 2010. La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural los Alcornocales. Universidad de Sevilla. España. 88p.
- Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce de León, J; Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Uruguay. 68 p.
- Rügnitz, M; Chacón, M; Porro, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima, Perú. 79 p.
- Salamanca Jiménez, A; Sadeghian Khalajabadi, S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4): 381 – 397.

- Sánchez Tello, S. 2015. Estado de los Bosques Andinos y el impulso a las plantaciones en Cajamarca. Gobierno Regional de Cajamarca. 26 p.
- Scalone, M. 2015. Morfología de los Suelos. (en línea). Consultado 30 ene. 2019. Disponible en <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2012/5922/Capitulo8.pdf>
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). s.f. ¿Qué es REDD+? (en línea). Consultado 30 ene. 2019. Disponible en <https://www.iucn.org/es/regiones/am%C3%A9rica-del-sur/nuestro-trabajo/cambio-clim%C3%A1tico-en-am%C3%A9rica-del-sur/bosques-y-cambio-clim%C3%A1tico/%C2%BFqu%C3%A9-es-redd>
- Vargas Cubas, OPL. 2013. Composición, diversidad florística y factores antrópicos de la degradación del bosque montano de Chadín, Chota. Tesis. Cajamarca, PE, Universidad Nacional de Cajamarca. 102 p.
- Vela Correa, G; López Blanco, J; Rodríguez Gamiño, M. de L; Chimal Hernández, A. 2009. "Vulnerabilidad del Suelo de Conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación", Informe Final, Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F., México.
- Vela Correa, G; López Blanco, J; Rodríguez Gamiño, M. de L. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. Investigaciones geográficas. 77. 18 – 30.
- Zanabria, R; Cuellar, JE. 2015. Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino, valle del Mantaro, Junín. Xilema. 28. 43-52.

VII. ANEXOS

Anexo 1. Formato para Georeferenciar las parcelas de muestreo en campo.

Tipo de bosque:.....

Parcela n°:

Ubicación geográfica (UTM)			
Coordenadas	Este (X)	Norte (Y)	Altitud (msnm)
Punto 1			
Punto 2			
Punto 3			
Punto 4			
Punto 5			

Anexo 2. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar el contenido de carbono orgánico.

Carbono Orgánico BP- P1 – 10CM	Carbono Orgánico BS - P1 – 10CM
Carbono Orgánico BP- P1 – 20CM	Carbono Orgánico BS - P1 – 20CM
Carbono Orgánico BP- P1 – 30CM	Carbono Orgánico BS - P1 – 30CM
Carbono Orgánico BP- P2 – 10CM	Carbono Orgánico BS - P2 – 10CM
Carbono Orgánico BP- P2 – 20CM	Carbono Orgánico BS - P2 – 20CM
Carbono Orgánico BP- P2 – 30CM	Carbono Orgánico BS - P2 – 30CM
Carbono Orgánico BP- P3 – 10CM	Carbono Orgánico BS - P3 – 10CM
Carbono Orgánico BP- P3 – 20CM	Carbono Orgánico BS - P3 – 20CM
Carbono Orgánico BP- P3 – 30CM	Carbono Orgánico BS - P3 – 30CM

Anexo 3. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar la densidad aparente.

Densidad Aparente BP- P1 – 10CM	Densidad Aparente BS - P1 – 10CM
Densidad Aparente BP- P1 – 20CM	Densidad Aparente BS - P1 – 20CM
Densidad Aparente BP- P1 – 30CM	Densidad Aparente BS - P1 – 30CM
Densidad Aparente BP- P2 – 10CM	Densidad Aparente BS - P2 – 10CM
Densidad Aparente BP- P2 – 20CM	Densidad Aparente BS - P2 – 20CM
Densidad Aparente BP- P2 – 30CM	Densidad Aparente BS - P2 – 30CM
Densidad Aparente BP- P3 – 10CM	Densidad Aparente BS - P3 – 10CM
Densidad Aparente BP- P3 – 20CM	Densidad Aparente BS - P3 – 20CM
Densidad Aparente BP- P3 – 30CM	Densidad Aparente BS - P3 – 30CM

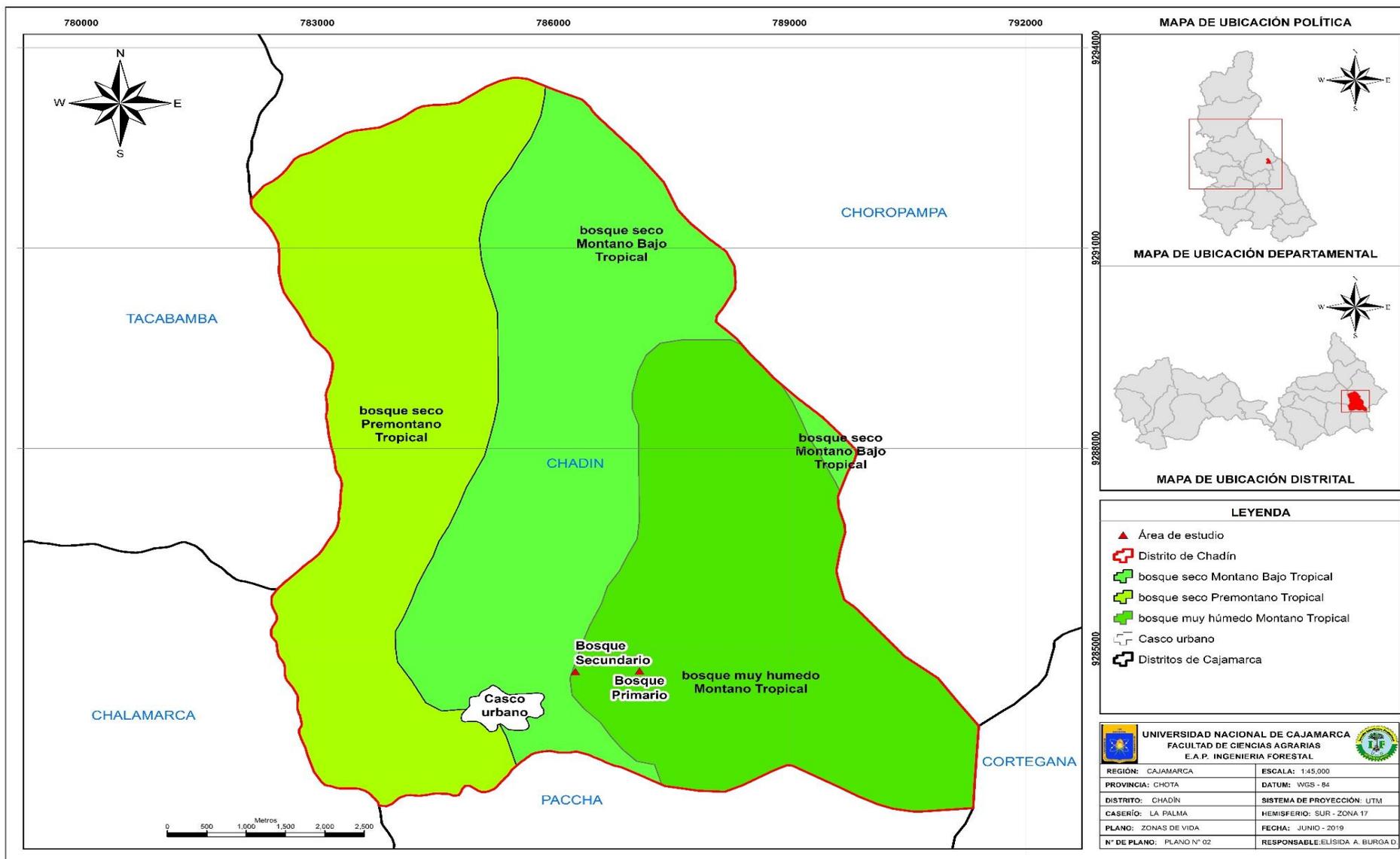
Anexo 4. Etiquetas para las muestras de suelo para determinar el color del suelo.

Color del suelo BP- P1 – 10CM	Color del suelo BS - P1 – 10CM
Color del suelo BP- P1 – 20CM	Color del suelo BS - P1 – 20CM
Color del suelo BP- P1 – 30CM	Color del suelo BS - P1 – 30CM
Color del suelo BP- P2 – 10CM	Color del suelo BS - P2 – 10CM
Color del suelo BP- P2 – 20CM	Color del suelo BS - P2 – 20CM
Color del suelo BP- P2 – 30CM	Color del suelo BS - P2 – 30CM
Color del suelo BP- P3 – 10CM	Color del suelo BS - P3 – 10CM
Color del suelo BP- P3 – 20CM	Color del suelo BS - P3 – 20CM
Color del suelo BP- P3 – 30CM	Color del suelo BS - P3 – 30CM

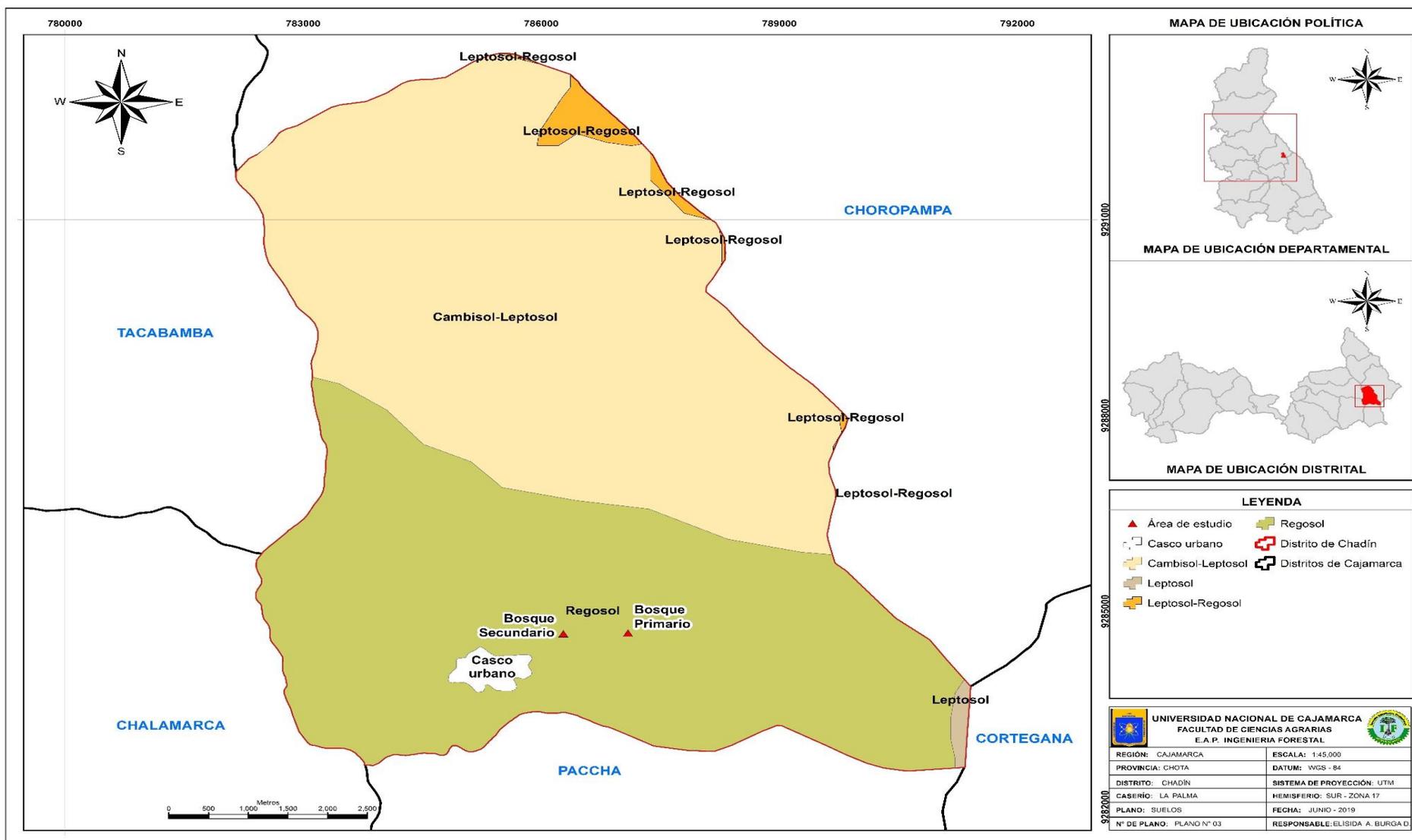
Anexo 5. Corrección de pendientes horizontales.

Pendiente (%)	Distancia horizontal: 20 metros
< 15	No se realiza corrección
15	20,2
20	20,4
25	20,6
30	20,9
35	21,2
40	21,5
45	21,9
50	22,4
60	23,3
70	24,4
80	25,6
90	26,9
100	28,3
110	29,7
120	31,2
130	32,8
140	34,4
150	36,1

Anexo 6. Zonas de vida del distrito de Chadín.



Anexo 7. Tipos de suelo (según la WRB) del distrito de Chadín.



*WRB: Base Referencial Mundial

Anexo 8. Georeferenciación de los puntos de muestreo del bosque primario y secundario.

Bosque	Parcela	Punto de muestreo	X - Coord.	Y - Coord.	Altitud (msnm)
Primario	P1	Punto 1	787076	9284690	2602
		Punto 2	787056	9284690	2607
		Punto 3	787056	9284710	2609
		Punto 4	787076	9284710	2609
		Punto 5	787066	9284700	2601
	P2	Punto 1	786807	9284693	2627
		Punto 2	786787	9284692	2632
		Punto 3	786787	9284712	2628
		Punto 4	786807	9284713	2629
		Punto 5	786797	9284703	2625
	P3	Punto 1	786783	9284937	2634
		Punto 2	786763	9284937	2640
		Punto 3	786763	9284957	2637
		Punto 4	786783	9284957	2639
		Punto 5	786773	9284947	2636
Secundario	P1	Punto 1	786538	9284684	2702
		Punto 2	786518	9284684	2699
		Punto 3	786518	9284704	2706
		Punto 4	786538	9284704	2706
		Punto 5	786528	9284694	2699
	P2	Punto 1	786293	9284677	2713
		Punto 2	786273	9284677	2712
		Punto 3	786273	9284697	2711
		Punto 4	786293	9284697	2714
		Punto 5	786283	9284687	2714
	P3	Punto 1	786274	9284938	2711
		Punto 2	786254	9284938	2718
		Punto 3	786254	9284958	2721
		Punto 4	786274	9284958	2712
		Punto 5	786264	9284948	2711

Anexo 9. Datos del cálculo de la densidad aparente de ambos bosques.

Código de la muestra	Peso seco (g)	Volumen del cilindro (cm³)	Densidad aparente (g cm⁻³)
B1° - P1 – 10 cm	49.9	95.03	0.53
B1° - P1 – 20 cm	70.9	95.03	0.75
B1° - P1 – 30 cm	86.3	95.03	0.91
B1° - P2 – 10 cm	50.9	95.03	0.54
B1° - P2 – 20 cm	65.2	95.03	0.69
B1° - P2 – 30 cm	80.5	95.03	0.85
B1° - P3 – 10 cm	40.2	95.03	0.42
B1° - P3 – 20 cm	53.2	95.03	0.56
B1° - P3 – 30 cm	75.5	95.03	0.79
B2° - P1 – 10 cm	53.8	95.03	0.57
B2° - P1 – 20 cm	72.2	95.03	0.76
B2° - P1 – 30 cm	75.8	95.03	0.80
B2° - P2 – 10 cm	45.9	95.03	0.48
B2° - P2 – 20 cm	70.6	95.03	0.74
B2° - P2 – 30 cm	84.00	95.03	0.88
B2° - P3 – 10 cm	56.6	95.03	0.60
B2° - P3 – 20 cm	84.4	95.03	0.89
B2° - P3 – 30 cm	92.2	95.03	0.97

Anexo 10. Color del suelo del bosque primario y secundario.

Código de la muestra	Color	
	Muestra húmeda	Muestra seca
B1° - P1 – 10 cm	10YR 4/2	10YR 4/3
B1° - P1 – 20 cm	10YR 4/2	10YR 4/3
B1° - P1 – 30 cm	10YR 5/2	10YR 5/4
B1° - P2 – 10 cm	10YR 3/3	10YR 3/2
B1° - P2 – 20 cm	10YR 3/1	10YR 4/2
B1° - P2 – 30 cm	10YR 3/1	10YR 6/2
B1° - P3 – 10 cm	10YR 3/4	10YR 4/3
B1° - P3 – 20 cm	10YR 3/2	10YR 4/2
B1° - P3 – 30 cm	10YR 4/3	10YR 5/4
B2° - P1 – 10 cm	10YR 5/2	10YR 6/3
B2° - P1 – 20 cm	10YR 5/4	10YR 6/3
B2° - P1 – 30 cm	10YR 5/4	10YR 7/3
B2° - P2 – 10 cm	10YR 4/3	10YR 5/4
B2° - P2 – 20 cm	10YR 5/2	10YR 6/2
B2° - P2 – 30 cm	10YR 5/6	10YR 6/3
B2° - P3 – 10 cm	10YR 3/3	10YR 5/4
B2° - P3 – 20 cm	10YR 4/2	10YR 6/3
B2° - P3 – 30 cm	10YR 5/4	10YR 6/3

Anexo 11. Datos del bosque primario.

Parcela	Prof. (cm)	Densidad aparente (g cm⁻³)	Carbono orgánico (%)	Carbono orgánico (t ha⁻¹)	Materia orgánica (t ha⁻¹)	CO₂ capturado (t ha⁻¹)
P1	0 - 10	0.53	7.54	39.96	68.89	146.66
	10 - 20	0.75	6.74	50.55	87.15	185.52
	20 - 30	0.91	5.9	53.69	92.56	197.04
P2	0 - 10	0.54	7.7	41.58	71.68	152.60
	10 - 20	0.69	7.16	49.40	85.17	181.31
	20 - 30	0.85	5.6	47.60	82.06	174.69
P3	0 - 10	0.42	7.24	30.41	52.42	111.60
	10 - 20	0.56	7.31	40.94	70.57	150.24
	20 - 30	0.79	5.87	46.37	79.95	170.19

Anexo 12. Datos del bosque secundario.

Parcela	Prof. (cm)	Densidad aparente (g cm⁻³)	Carbono orgánico (%)	Carbono orgánico (t ha⁻¹)	Materia Orgánica (t ha⁻¹)	CO₂ Capturado (t ha⁻¹)
P1	0 - 10	0.57	6.74	38.42	66.23	140.99
	10 - 20	0.76	4.72	35.87	61.84	131.65
	20 - 30	0.80	3.81	30.48	52.55	111.86
P2	0 - 10	0.48	7.35	35.28	60.82	129.48
	10 - 20	0.74	4.95	36.63	63.15	134.43
	20 - 30	0.88	3.09	27.19	46.88	99.79
P3	0 - 10	0.60	7.31	43.86	75.61	160.97
	10 - 20	0.89	4.31	38.36	66.13	140.78
	20 - 30	0.97	3.12	30.26	52.18	111.07

Anexo 13. Carbono orgánico promedio por profundidad.

Tipo de bosque	Profundidad (cm)	Carbono orgánico (%)	Carbono orgánico (t ha ⁻¹)
Primario	0 - 10	7.49	37.22
	10 - 20	7.07	47.13
	20 - 30	5.79	49.22
Secundario	0 - 10	7.13	39.23
	10 - 20	4.66	37.12
	20 - 30	3.34	29.50

Anexo 14. Carbono orgánico total por parcela de muestreo.

Tipo de bosque	Parcela	Carbono orgánico total (t ha ⁻¹)
Primario	P1	144.20
	P2	138.58
	P3	117.72
Secundario	P1	104.77
	P2	99.10
	P3	112.48

Anexo 15. Densidad aparente promedio por profundidad.

Tipo de bosque	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g cm ⁻³)
Primario	0 - 10	0.50
	10 - 20	0.67
	20 - 30	0.85
Secundario	0 - 10	0.55
	10 - 20	0.80
	20 - 30	0.88

Anexo 16. Panel fotográfico



Figura 29. Interior del bosque primario.



Figura 30. Mediciones para determinar la pendiente de la parcela.



Figura 31. Georeferenciando la semi-calicata con GPS.



Figura 32. Limpiando la hojarasca del suelo.



Figura 33. Aperturando la semi - calicata.



Figura 34. Medición de la profundidad de la semi - calicata.



Figura 35. Saliendo del bosque Secundario.

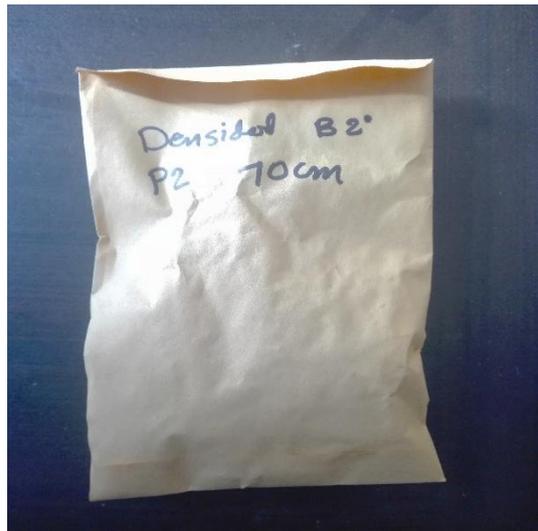


Figura 36. Sobre manila con muestra de suelo para determinar densidad aparente.



Figura 37. Pesando el suelo seco y anotando los resultados.



Figura 38. Muestras de suelo recogidas de campo.



Figura 39. Comparación del color del suelo con las hojas de la tabla de Munsell.

Anexo 17. Resultados del Laboratorio de Servicio del INIA sobre carbono orgánico del suelo.



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
 "Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota – Chadín – La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al meq/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B1 P1 10 cm	SU0461-EEBI-19	--	--	--	7.54	--	--	--	--	--
B1 P1 20 cm	SU0462-EEBI-19	--	--	--	6.74	--	--	--	--	--
B1 P1 30 cm	SU0463-EEBI-19	--	--	--	5.90	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
 Potasio (K) : --
 pH (reacción) : --
 Materia orgánica (M.O) : --
 Clase textural : --



INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
 Estación Experimental Soils del Inia

 Ingrid Velásquez Camacho
 JEFE LABORATORIO DE SUELOS



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota – Chadín – La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al mg/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B1 P2 10 cm	SU0464-EEBI-19	--	--	--	7.70	--	--	--	--	--
B1 P2 20 cm	SU0465-EEBI-19	--	--	--	7.16	--	--	--	--	--
B1 P2 30 cm	SU0466-EEBI-19	--	--	--	5.60	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
 Potasio (K) : --
 pH (reacción) : --
 Materia orgánica (M.O) : --
 Clase textural : --



INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
 Estación Experimental Baños del Inca

 Ing. Luis A. Velásquez Camacho
 JEFE LABORATORIO DE SUELOS



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota - Chadín - La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al mg/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B1 P3 10 cm	SU0467-EEBI-19	--	--	--	7.24	--	--	--	--	--
B1 P3 20 cm	SU0468-EEBI-19	--	--	--	7.31	--	--	--	--	--
B1 P3 30 cm	SU0469-EEBI-19	--	--	--	5.87	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
Potasio (K) : --
pH (reacción) : --
Materia orgánica (M.O) : --
Clase textural : --



ING. JULIO A. VELÁSQUEZ CAMACHO
JEFE LABORATORIO DE SUELOS



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota – Chadín – La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al mg/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B2 P1 10 cm	SU0470-EEBI-19	--	--	--	6.74	--	--	--	--	--
B2 P1 20 cm	SU0471-EEBI-19	--	--	--	4.72	--	--	--	--	--
B2 P1 30 cm	SU0472-EEBI-19	--	--	--	3.81	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
Potasio (K) : --
pH (reacción) : --
Materia orgánica (M.O) : --
Clase textural : --



INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
Estación Experimental Ranos del Inca
Inga Tuto A. Velásquez Camacho
JEFE LABORATORIO DE SUELOS



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota – Chadín – La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al mg/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B2 P2 10 cm	SU0473-EEBI-19	--	--	--	7.35	--	--	--	--	--
B2 P2 20 cm	SU0474-EEBI-19	--	--	--	4.95	--	--	--	--	--
B2 P2 30 cm	SU0475-EEBI-19	--	--	--	3.09	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
 Potasio (K) : --
 pH (reacción) : --
 Materia orgánica (M.O) : --
 Clase textural : --



INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
Estación Experimental Baños del Inca

Ing. Juan A. Velásquez Camacho
JEFE LABORATORIO DE SUELOS



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

LABORATORIO DE SERVICIO DE SUELOS

NOMBRE : ANGELICA BURGA DIAZ

PROCEDENCIA: Chota - Chadin - La Palma

Fecha: 22-06-2019

RESULTADOS DE ANALISIS

Nombre Parcela	Código Laboratorio	P ppm	K ppm	pH	C.O %	Al mg/100g	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
B2 P3 10 cm	SU0476-EEBI-19	--	--	--	7.31	--	--	--	--	--
B2 P3 20 cm	SU0477-EEBI-19	--	--	--	4.31	--	--	--	--	--
B2 P3 30 cm	SU0478-EEBI-19	--	--	--	3.12	--	--	--	--	--

INTERPRETACIÓN

Fósforo (P) : --
Potasio (K) : --
pH (reacción) : --
Materia orgánica (M.O) : --
Clase textural : --



INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
Estación Experimental de Baños de Inca
[Signature]
Ing. Tullio A. Velásquez Camacho
JEFE LABORATORIO DE SUELOS