



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

TRABAJO DE TITULACIÓN

“EFECTOS DEL CAMBIO DE USO EN LA DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO
ASOCIADO A AGREGADOS DEL SUELO BAJO BOSQUE CEJA ANDINA”.

AUTORES:

Karen Andrea Cabrera Montero

Luis Aníbal Sanaguano Ulloa

TUTOR:

PhD. Omaira Márquez

Riobamba – Ecuador

Año 2019

CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO EN LA DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO ASOCIADO A AGREGADOS DEL SUELO BAJO BOSQUE CEJA ANDINA**, presentado por: Karen Andrea Cabrera Montero y Luis Aníbal Sanaguano Ulloa.

Dirigido por: PhD. Omaira Márquez

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

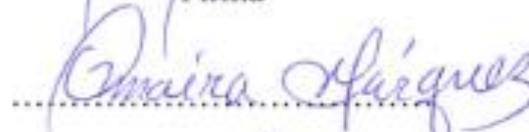
PhD. Iván Ríos

Presidente del tribunal


.....
Firma

PhD. Omaira Márquez

Tutora del Proyecto


.....
Firma

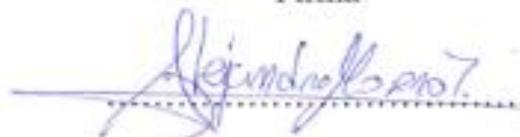
MsC. Patricio Santillán

Miembro del Tribunal


.....
Firma

MsC. Gabriel Moreno

Miembro del Tribunal


.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención del título de INGENIERO AMBIENTAL, elaborado por los señores: Karen Andrea Cabrera Montero y Luis Anibal Sanaguano Ulloa, con el tema: "EFECTOS DEL CAMBIO DE USO EN LA DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO ASOCIADO A AGREGADOS DEL SUELO BAJO BOSQUE CEJA ANDINA", el mismo que fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutora y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que se puede informar en honor a la verdad.



PhD. Omaira Márquez

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Karen Andrea Cabrera Montero, con cédula de identidad No. 0605905728, y Luis Anibal Sanaguano Ulloa con cédula de identidad No. 0604798132, somos responsables de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizada en la presente investigación y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Karen Andrea Cabrera Montero
CI. 0605905728



Luis Anibal Sanaguano Ulloa
CI. 0604798132

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Chimborazo, porque me permitió formarme y educarme en esta maravillosa carrera.

A Dios por permitirme llegar hasta este eslabón en mi vida, porque sé que más cosas buenas me tiene preparado.

A mis padres y hermanos por la invaluable ayuda brindada, por el amor recibido, paciencia, consejos y enseñanzas en el transcurso de mi vida.

A mi directora de tesis PhD. Omaira Márquez por compartirme sus conocimientos, por su dedicación y esfuerzo, por la paciencia que ha tenido, su experiencia y motivación me han logrado culminar con éxito mi meta.

Al equipo técnico del proyecto de investigación “Soil Organic Carbon Evaluation and Sequestration in Ecuadorian Paramo Ecosystem”, Dr. Víctor García, Ingenieros Franklin Cargua y Marco Rodríguez por su amistad, ayuda, por sus consejos y ánimos.

Karen Andrea Cabrera Montero

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi guía en este camino y ser mejor cada día, a mi familia por ser un pilar fundamental en mi vida y apoyarme en cada decisión y proyecto.

A la PhD. Omaira Márquez por brindarme el apoyo y conocimiento para realizar mi trabajo de titulación.

Al Ing. Marco Rodríguez por su apoyo técnico para la realización de la tesis.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por permitirme formarme como profesional.

A todas las personas y amigos que de manera directa e indirecta fueron partícipes de este proceso y aportaron para la culminación de mis estudios.

Luis Aníbal Sanaguano Ulloa

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por darme salud, sabiduría, por guiarme siempre hacia el camino del bien, por brindarme un sin número de oportunidades para salir adelante, hoy gracias a ti se cumple mi tan anhelado sueño.

A los seres que más amo en esta vida, a mis padres Carmita y Fernando que han sido siempre mi motor de vida para cumplir con todos mis propósitos, los que nunca me han dejado sola y nunca lo harán, los que con sus consejos y apoyo siempre me han dado la mano para levantarme y continuar, gracias por su impresionante esfuerzo por sacarme adelante ante cualquier situación, por su apoyo único e incondicional, jamás me alcanzaré la vida para agradecerles por tanto, a ustedes los seres más importantes en mi vida les dedico este logro, porque tanto como mío también es de ustedes.

A mis hermanos Karina y Fernando, por el apoyo que me han brindado siempre, por estar pendientes de mí y nunca olvidarse de su hermanita que tanto los quiere.

Karen Andrea Cabrera Montero

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a mi familia que gracias a su apoyo incondicional pude concluir con mi carrera.

A Dios que gracias a su amor y bondad me permite hoy sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda cuando caigo y me pones a prueba, he aprendido a levantarme y aprender de mis errores.

A mi padre Washington por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre. A mi madre Margarita por hacer de mí una mejor persona a través de su amor, comprensión y enseñanzas. A mi hermano Dennis por estar siempre presente en mi camino apoyándome todo este tiempo.

A mis padrinos Marco y Paulina que no solo han sido parte importante en esta etapa si no en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mi persona de mi vida.

Quiero agradecerles por todo, no me alcanzan las palabras para expresar el orgullo y emoción que siento al tener una familia tan asombrosa.

Luis Aníbal Sanaguano Ulloa

SIGLAS Y ABREVIATURAS

COS	Carbono Orgánico del Suelo
CO	Carbono Orgánico
C	Carbono
Bo	Bosque
Pa	Pasto
mg	Miligramos
MO	Materia Orgánica
C/N	Condiciones Normales
NPP	Producción Primaria Neta
SOM	Materia Orgánica del Suelo
DAS	Dinámica de Agregados del Suelo
DI	Índice de Disrupción
ADI	Índice de Agregación – Disrupción
Se	Superficie específica
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
FA	Franco Arcilloso
FL	Franco Limoso
FAL	Franco Arcilloso Limoso
A	Arcilloso
DA	Densidad Aparente
NS	No Significativo
Agg	Agregado
mgC/kgagg	Miligramos de Carbono por Kilogramos de Agregados

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL	i
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	vi
SIGLAS Y ABREVIATURAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. Objetivo General.....	3
2. Objetivos Específicos	3
ESTADO DEL ARTE	4
1. Bosque Siempre Verde Montano Alto de Llucud	4
2. Ecosistema Pastizal	4
3. Especies de Pasto Cultivado	4
4. Cambio de Uso de Suelo	5
5. Indicadores de la Calidad del Suelo	5
5.1 Indicadores Físicos.....	6
5.2 Indicadores Químicos	6
5.3 Indicadores Biológicos.....	6
6. Captura y Secuestro de Carbono en el Suelo.....	6
7. Dinámica del Carbono Orgánico en el Suelo	7
8. Concepto de Agregados del Suelo.....	8
9. Dinámica de los Agregados Asociados al Suelo	8
10. Modelo de la Dinámica de Agregados del Suelo (DAS).....	9
METODOLOGÍA.....	15
1. Área de Estudio	15
2. Determinación de Conglomerados de Muestreo	16
3. Recolección de Muestras de Suelo	16
4. Caracterización del Suelo	16
4.1 pH.....	17

4.2	Textura	17
4.3	Densidad Aparente	17
4.4	Humedad Relativa.....	17
4.5	Superficie Específica (Se).....	18
4.6	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	18
5.	Determinación de Agregados por Distribución Tamaño – Estabilidad.....	19
5.1	Tratamiento Seco	19
5.2	Tratamiento Húmedo	20
6.	Análisis Estadístico	21
7.	Determinación del Contenido de Carbono Orgánico Asociado a los Agregados.....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		22
1.	Estratificación y Establecimiento de Conglomerados de Muestreo	22
2.	Caracterización del Suelo	23
2.1	pH.....	23
2.2	Color.....	24
2.3	Textura	25
2.4	Densidad Aparente (DA)	25
2.5	Humedad Relativa (HR%)	26
2.6	Superficie Específica (Se).....	27
3.	Distribución de Agregados por tamaño y estabilidad del suelo bajo Bosque y Pasto	27
3.1	Distribución de Agregados por Tamaño	27
3.2	Distribución de Agregados por Estabilidad	29
4.	Índices de Estabilidad de Macroagregados Estables e Inestables del Suelo bajo Bosque y Pasto.	31
4.1	Índice de Formación de Macroagregados Estables e Inestables (FIS o FIU) ...	31
4.2	Índice de Estabilización y Desestabilización de Macroagregados Estables (SSM o DSM)	31
4.3	Índice de Disrupción (DI)	32
4.4	Índice Total de Agregación – Disrupción (ADI)	32
5.	Dinámica de los Agregados del Suelo bajo Bosque y Pasto	33
5.1	Estabilización/Desestabilización.....	33
5.2	Disrupción.....	34
5.3	Agregación	34

6. Dinámica del Carbono Orgánico Asociado a los Agregados del Suelo bajo Bosque y Pasto	34
6.1 Índice de Estabilización y Desestabilización de Macroagregados Estables (SSM o DSM).	34
6.2 Índice de Disrupción (DI)	35
6.3 Índice Total de Agregación – Disrupción (ADI)	35
6.4 Estabilización/Desestabilización.....	36
6.5 Agregación	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
ANEXOS	44
Anexo 1. Coordenadas de los Puntos de Muestreo	44
Anexo 2. Propiedades Físicas y Químicas de los suelos	45
Anexo 3. Fotografías	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica de Agregados en el Suelo (DAS).....	14
Figura 2. Ubicación del área de estudio “Bosque Siempre Verde Montano Alto de los Andes Orientales”	15
Figura 3. Parcelas permanentes de muestreo	16
Figura 4. Procedimiento para evaluar distribución y estabilidad de los agregados.....	20
Figura 5. Tipos de Uso (Bosque y Pasto) y Establecimiento de Conglomerados de Muestreo.....	22
Figura 6. Valores de pH de Estratos, Bosque y Pasto.	23
Figura 7. Color de los Suelos bajo Bosque y Pasto	24
Figura 8. Clases Texturales de los Estratos, Bosque y Pasto	25
Figura 9. Densidad Aparente en Suelos bajo Bosque y Pasto.	26
Figura 10. Contenido de Humedad en los Estratos, Bosque y Pasto.....	26
Figura 11. Superficie Específica en función a los Estratos, Bosque y Pasto.....	27
Figura 12. Distribución de Agregados bajo Bosque y Pasto (Tratamiento seco).....	28
Figura 13. Distribución de Agregados bajo Bosque y Pasto (tratamiento húmedo).	29
Figura 14. Distribución de Agregados Estables bajo Bosque y Pasto.....	30
Figura 15. Distribución de Agregados Inestables bajo Bosque y Pasto.	30
Figura 16. Dinámica de los Agregados en el Suelo (DAS).....	33
Figura 17. Dinámica del Carbono Orgánico Asociado a los Agregados del Suelo.....	36
Figura 18. Carbono Asociado a los Macroagregados.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de Varianza de la Comparación de la Proporción de Agregados Estables e Inestables en cada Fracción de Agregados de Bosque (BO) y Pasto (PA).	29
Tabla 2. Indicadores de Dinámica de Agregados del Suelo.	32
Tabla 3. Indicadores de la Dinámica de Agregados del Suelo.	35

RESUMEN

El cambio climático es un problema ambiental al que debe hacer frente la sociedad, sin embargo, hay alternativas para mitigarlo y en ese contexto, el suelo puede jugar un papel importante, a través del secuestro de carbono atmosférico, como carbono orgánico de los suelos. Esta investigación tiene como objetivo el estudio de la dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados del suelo bajo “Bosque Ceja Andina” (Bo) y su reemplazo por Pastizal (Pa). El estudio se realizó usando un muestreo con doble estratificación, para ello se establecieron 3 conglomerados en suelos bajo (Bo) y (Pa) respectivamente. Se determinó la distribución de agregados del suelo y se cuantificó el carbono orgánico asociado a ellos. Los índices del modelo dinámico de agregados del suelo (DAS) permitieron monitorear los procesos de agregación, disrupción y desestabilización debido a los cambios de uso del bosque. El índice de agregación – disrupción (ADI) fue negativo -0.5% predominando el proceso de disrupción por el cambio de (Bo) a (Pa). Los valores de esta degradación fueron significativos en la fracción de los macroagregados grandes ($> 2000 \mu\text{m}$), lo que trajo como consecuencia la pérdida neta de 59.5 mg C que estaban asociados a estos macroagregados. Se concluye que el cambio de bosque a pastizal conduce a una disminución en las reservas de carbono en el suelo. Por lo tanto, para conservar los niveles de carbono secuestrados en estos suelos se recomienda tomar medidas que restrinjan el cambio de uso de los suelos bajo el Bosque de Ceja Andina.

Palabras claves: Agregados, Agregación, Disrupción, Desestabilización, Carbono.

ABSTRACT

Climate change is an environmental problem that society must face; however, there are alternatives to mitigate it and, in this context, soil can play an important role, through the abduction of atmospheric carbon, as organic carbon in soils. This research studies the dynamics of organic carbon associated with soil aggregates under "Ceja Andina forest" (Bo) and its replacement by Pastureland (Pa). This study was carried out by using double stratified sampling, 3 clusters were established in low (Bo) and (Pa) lands, respectively. The distribution of soil aggregates was determined, and the organic carbon associated with them was quantified. The index of the dynamic model of soil aggregates (DAS) allowed monitoring the processes of aggregation, disruption, and destabilization due to changes in forest use. The aggregation-disruption index (ADI) was negative -0.5%, the disruption process being predominant due to the shift from (Bo) to (Pa). The values of this degradation were significant in the fraction of large macroaggregates ($> 2000 \mu\text{m}$), which resulted in the net loss of 59.5 mg C that was associated with these macroaggregates. We concluded that the change from forest to grassland leads to a decrease in carbon stocks in the soil. Therefore, to conserve the levels of carbon suggested for these soils, it is recommended to take measures that restrict the change of use of lands under the Ceja Andina Forest.

Keywords: Aggregates, Aggregation, Disruption, Destabilization, Carbon.

Translation reviewed by;



MsC. Edison Damián.



INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo provee nutrientes e influye en la agregación y la infiltración del agua, representa una parte importante del reservorio total de carbono orgánico del suelo (COS). El contenido de carbono orgánico (CO) del suelo es controlado por el balance entre el CO que ingresa a través de la descomposición de la materia orgánica y el CO que se libera producto de la mineralización (Betania, 2016).

La formación de agregados del suelo es el resultado complejo de la interacción entre procesos biológicos, químicos y físicos en el suelo. Los factores que agrupan la estabilidad de agregados en el suelo pueden ser agrupados en abióticos (arcillas, sesquióxidos, cationes), bióticos (materia orgánica, actividad de las plantas, fauna y microorganismos) y del medioambiente (temperatura y humedad del suelo) (Pedraza & Marquez, 2010).

En la actualidad, la acumulación y el secuestro de carbono se entienden como un servicio ecosistémico que cumple funciones importantes para la regulación de la concentración de gases en la atmósfera. El secuestro de carbono en el suelo es la remoción del carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis de las plantas y su almacenamiento como formas de materia orgánica estables y de larga vida en el suelo (Rekik, Alcantara & Wiese, 2017).

Los suelos son el mayor reservorio de carbono de la Tierra, ya que contienen más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. El carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico, sin embargo, los impactos antropogénicos en el suelo pueden convertirlo en un sumidero neto o una fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI). Se ha logrado un enorme progreso científico en la comprensión y explicación de la dinámica COS, sin embargo, la protección y el monitoreo de los depósitos de COS en lo nacional y global tiene retos complicados que obstaculizan el diseño efectivo de políticas y la adaptación e implementación sobre el terreno (Robertson *et al.*, 2016; Lefèvre *et al.*, 2017).

Los bosques primarios se han visto sometidos a cambios en el uso de suelo por sistemas de labranza, el mismo que se ve afectado por la disminución de carbono orgánico y a otras propiedades del suelo, como es la zona de estudio (Bosque Ceja Andina). Debido a que las plantas son responsables de la gran mayoría de la captura del carbono a través de ecosistemas

terrestres. La mayor parte de este carbono se regresa a la atmósfera mediante una serie de procesos que incluyen la respiración, el consumo (seguido de la respiración animal y microbial), la combustión (por ejemplo, los incendios), y la oxidación química (Aguirre & González, 2012). El cambio de uso de la tierra en regiones tropicales ha traído como consecuencia un aumento en la tasa de deforestación, lo cual ha resultado en una serie de efectos negativos sobre la biodiversidad, el almacenamiento de agua y nutrientes del suelo (Gonzalez & Dezzeo, 2011).

Los agregados resultan ser las estructuras que confieren al medio edáfico su porosidad y permeabilidad en todo lo relacionado con el flujo de agua y aireación del suelo. Del mismo modo fijan los nutrientes, poniéndolos a disposición de las plantas (Garland *et al.*, 2014). Está generalmente aceptado que la dinámica de formación de agregados sigue el modelo jerárquico de agregación del suelo propuesto por Totsche (2018), según el cual los microagregados (250 μm), siendo las fuerzas de cohesión intra-agregados mayores que las fuerzas inter-agregados.

La estabilidad de los primeros varia con los cambios de la materia orgánica y por las prácticas de manejo, debido a que los agregados son estabilizados transitoriamente por agentes tales como: raíces, hifas y polisacáridos derivados de plantas y microorganismos (García, Márquez, & Lopez, 2010). Por otro lado, los pastos han sido considerados como más efectivos debido a su sistema de enraizamiento, estructuración, composición de los agregados y su resistencia al tratamiento mecánico en tierras. Al evaluar la relación entre la estabilidad de los agregados y los constituyentes orgánicos, sugiere a los carbohidratos como la fracción orgánica más importante en la formación de agregados estables, de acuerdo con la alta correlación encontrada entre ambas (García *et al.*, 2010).

Estudios realizados por Márquez, García, Schultz, & Isenhardt, en el (2019) mediante el cual propusieron un modelo teórico conceptual que integra los procesos involucrados en la dinámica de los agregados del suelo. Este modelo propone una serie de índices que permiten monitorear la dinámica de agregados del suelo valorando los procesos de agregación, disrupción y desestabilización. Es por ello que el objetivo de esta investigación es cuantificar la distribución de agregados por tamaño, estabilidad, así como también el carbono asociado a estos agregados en suelos bajo “Bosque de Ceja Andina” y en suelos que han sufrido replazo por pastos en la Cuenca del río Chambo, de la provincia de Chimborazo.

OBJETIVOS

1. Objetivo General

Estudiar el efecto que tiene el cambio de uso de “Bosque de Ceja Andina” a Pasto en la dinámica del carbono asociado a los agregados del suelo.

2. Objetivos Específicos

- Determinar la distribución de agregados por tamaño y estabilidad del suelo bajo Bosque y Pasto.
- Evaluar los índices de estabilidad de macroagregados estables e inestables del suelo de Bosque y Pasto.
- Evaluar la dinámica de agregados del suelo, en suelos bajo “Bosque de Ceja Andina” y bajo Pasto.
- Estudiar la dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados bajo “Bosque de Ceja Andina” y bajo Pasto.

ESTADO DEL ARTE

1. Bosque Siempre Verde Montano Alto de Llucud

El bosque montano es uno de los ecosistemas menos conocidos y mayormente amenazados en el Ecuador (Caranqui, 2011). Perteneciente a la comunidad San Pedro de Llucud, el bosque primario de Llucud está ubicado en el noreste del cantón Chambo a 7,5 km de la ciudad, a una altitud de 3000 m.s.n.m (Ojeda, 2017). El Bosque Siempre verde Montano alto se extiende desde los 2.900 hasta los 3.600 m.s.n.m Incluye la “Ceja Andina” o vegetación de transición entre los bosques montano altos y el páramo (Caranqui, 2011). La importancia que tiene un bosque montano es protector de fuentes de agua y generador de hábitat de especies únicas en flora y fauna e interacciones para el equilibrio ecológico. Se estima que hemos perdido 90-95% de los bosques norandinos debido a la deforestación. Se puede ver fácilmente como se sigue utilizando la tierra para cultivos y pastoreos.

2. Ecosistema Pastizal

Una contribución importante para abatir el aumento de CO₂ en la atmósfera es incrementar los reservorios de carbono edáfico, el cual tiene tiempos medios de residencia más prolongados que la vegetación. Las tierras de pastoreo juegan un papel importante en el secuestro de C, ya que los pastizales contribuyen a mitigar el cambio climático global al almacenar C en la biomasa por el proceso de la fotosíntesis y en el suelo por el ciclo del C (Flores, Fernández, & Gobbi, 2012). Las tierras de pastoreo ocupan 3200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 miles de millones de Mg de C en el ecosistema total, gran parte debajo de la superficie y en un estado relativamente estable (Flores *et al.*, 2012).

3. Especies de Pasto Cultivado

El pasto cultivado es el principal cultivo pecuario de la comunidad de “San Pedro de Llucud”, generalmente se siembra rey grass (*Lolium multiflorum*), trébol (*Trifolium repens*), vicia (*Vicia sativa*) y avena forrajera (*Arrenatherum elatius*); se observan también pastos naturales como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) que es de excelente calidad para el ganado lechero (Ojeda, 2017). Los suelos de los pastizales se han destacado como un sumidero global de carbono (C) en el suelo, y tienen un potencial de aumento de carbono.

El secuestro del mismo puede ocurrir a través de la incorporación de carbono orgánico (CO) en el suelo dentro de los microagregados y las fracciones de limo y arcilla (Torres-sallan, Creamer, Lanigan, Reidy, & Byrne, 2018). Los pastos por su sistema de enraizamiento son considerados más efectivos que la aplicación de abono orgánico, para la estructuración, composición de agregados y resistencia al tratamiento mecánico de las tierras (García *et al.*, 2010).

4. Cambio de Uso de Suelo

El uso inadecuado del suelo produce la degradación de su estructura, afectando al ecosistema y reduciendo su potencial productivo. Los sistemas de labranza modifican la cantidad y distribución del carbono, influyendo sobre la estabilidad estructural de los suelos (Iglesias, Galantini, & Vallejos, 2017). La deforestación debida al cambio en el uso de la tierra generalmente aumenta la descomposición del carbono orgánico del suelo (COS) y disminuye la formación de nuevo COS (Schweizer, Fischer, Häring, & Stahr, 2017). Un indicador de calidad física de suelo se vincula con procesos de degradación químicos y biológicos, donde las variables más estudiadas son la materia orgánica (MO) y la actividad biológica (Iglesias *et al.*, 2017). Además, un suelo estructuralmente degradado es más vulnerable al impacto mecánico de las gotas de lluvia, induciendo una mayor degradación (Schweizer *et al.*, 2017).

5. Indicadores de la Calidad del Suelo

Los indicadores de la calidad de suelo se conciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características. Estos se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado (García & Ramírez, 2012).

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de la calidad deben cubrir ciertas condiciones (García & Ramírez, 2012):

- Ser adecuados al nivel de análisis y al sistema estudiado.
- Reflejar el atributo de sostenibilidad que se quiere evaluar.
- Deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo, tanto en los procesos de degradación como en los de recuperación.
- Deben integrar los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

- Deben ser relativamente fáciles de medir en condiciones de campo, tanto por los productores como por los especialistas.

Considerando estos indicadores se establecieron un mínimo de propiedades del suelo para ser utilizadas:

5.1 Indicadores Físicos

La estructura, densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada, son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad (García & Ramírez, 2012).

5.2 Indicadores Químicos

Los indicadores químicos se refieren a las condiciones que afectan la relación suelo-planta, calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo y disponibilidad de agua con nutrientes para las plantas y los microorganismos. Entre ellos se encuentran disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, carbono orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de absorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, el nitrógeno total y nitrógeno mineralizable (García & Ramírez, 2012).

5.3 Indicadores Biológicos

Los indicadores biológicos integran una gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y subproductos de los macroinvertebrados entre ellos están: biomasa microbiana, respiración edáfica y número de lombrices (García & Ramírez, 2012).

6. Captura y Secuestro de Carbono en el Suelo

Se está discutiendo y promoviendo por algunos gobiernos e industrias un "instrumento" adicional para mitigar el cambio climático. Este "instrumento" es la captura y secuestro de carbono (CCS, acrónimo de Carbón Capture and Storage). Un sistema para atrapar el CO₂ de la quema de los combustibles fósiles y "almacenarlo" bajo el mar o la superficie de la tierra. Este asunto rápidamente ha pasado a formar parte de una iniciativa mundial de investigación y desarrollo. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) publicó un informe especial sobre CCS en septiembre de 2005.

El secuestro de carbono es el proceso de captura y almacenamiento a largo plazo del dióxido de carbono atmosférico y puede referirse específicamente a: “El proceso de retirar el carbono de la atmósfera y depositarlo en un depósito”. Cuando se lleva a cabo deliberadamente, esto también puede denominarse eliminación de dióxido de carbono, que es una forma de geoingeniería. El secuestro de carbono describe el almacenamiento a largo plazo de dióxido de carbono u otras formas de carbono para mitigar o aplazar el calentamiento global y evitar el cambio climático peligroso. El dióxido de carbono se captura naturalmente de la atmósfera a través de procesos biológicos, químicos o físicos (Rekik, Alcantara, & Wiese, 2017).

El carbono recién agregado puede estabilizarse en el suelo mediante una serie de mecanismos. Físicamente, el carbono puede estabilizarse a través de su aislamiento dentro de micro y macro agregados del suelo donde es inaccesible para los organismos del suelo. Químicamente, el carbono puede adsorberse fuertemente a arcillas a través de enlaces químicos que impiden el consumo de carbono por los organismos. Bioquímicamente, el carbono puede ser resintetizado en estructuras complejas de moléculas que pueden impedir la descomposición. Los tres mecanismos dependen de una serie de factores bióticos, abióticos y de gestión que determinan la eficacia de estabilización del carbono en el suelo (Rekik *et al.*, 2017).

7. Dinámica del Carbono Orgánico en el Suelo

Se necesitan varios años de cultivo de pasto para obtener un beneficio de secuestro de carbono del suelo, sin embargo estudios anteriores han demostrado que la variación en las tasas estimadas de acumulación de carbono puede atribuirse a una variedad de factores que incluyen la textura del suelo, comunidad vegetal, producción de biomasa, y riqueza de especies (Márquez, García, Schultz, & Isenhardt, 2017). Algunos rasgos funcionales de la planta, incluidos los rasgos foliares (área específica de la hoja, relación C/N) y rasgos de las raíces involucradas en la adquisición de nutrientes (longitud específica de la raíz, carboxilato y exudación de protones), tienen diferentes efectos en la adquisición de recursos, el almacenamiento de C y las comunidades de patógenos en los suelos (Bottinelli *et al.*, 2015). Por otro lado, las especies de plantas difieren en la producción de biomasa y el almacenamiento de carbono del suelo, se controla principalmente mediante dos procesos fundamentales: Producción primaria neta (NPP) y descomposición. Un aumento en la NPP

conduce a un aumento en el almacenamiento de carbono, mientras que el aumento de la descomposición tiene el efecto contrario (Márquez *et al.*, 2017).

8. Concepto de Agregados del Suelo

Los agregados del suelo son considerados asociaciones órgano-minerales primarias del suelo totalmente disperso como las unidades estructurales básicas en el suelo, siendo las reacciones superficiales entre materia orgánica (OM), organismos y minerales los principales mecanismos reguladores para su formación, incluye además complejos secundarios que reflejan el grado de agregación de los complejos órgano-minerales primarios, lo que se conoce como el segundo nivel de complejidad, mientras que el suelo estructuralmente intacto (suelo *in situ*) constituye el tercer nivel de complejidad. La estructura tridimensional de los microagregados del suelo define un sistema bastante estable y complejo de huecos y poros interconectados y sin salida de diversos tamaños, formas y geometrías, que proporciona una interfaz biogeoquímica interna y externa extremadamente grande, heterogénea y morfológicamente compleja (Torres-sallan *et al.*, 2018).

9. Dinámica de los Agregados Asociados al Suelo

La dinámica entre el ciclo del carbono orgánico del suelo (SOC) y los agregados parece estar controlada por la formación y destrucción de asociaciones órgano-minerales espaciales y han sido divididas en complejos órgano-minerales primarios y secundarios (Pedraza & Marquez, 2010). El ciclo de SOC es diferente en el subsuelo en comparación con la capa superior del suelo. Otros estudios indican que la composición química de la materia orgánica en el subsuelo está afectada por procesos pedológicos y, por lo tanto, es específico del tipo de suelo (Torres-sallan *et al.*, 2018).

La materia orgánica se agrega continuamente al suelo, la destrucción de macro agregados debido a la descomposición de la materia orgánica, es compensada por la continua entrada de nueva materia orgánica. Por lo tanto, a medida que la estabilidad de una parte de los macroagregados disminuye debido a los procesos de descomposición, otros macroagregados se forman y se estabilizan y, además, la estabilización de nuevos macroagregados puede ocurrir a expensas de la descomposición de macroagregados más antiguos y menos estables (Márquez *et al.*, 2017). El proceso de agregación en sí mismo es un medio para conservar la

materia orgánica y permitir que la materia orgánica almacenada funcione como un reservorio de nutrientes y energía para las plantas. También el papel de la materia orgánica en la agregación tiene implicaciones importantes para el funcionamiento del suelo en la regulación de infiltración de aire y agua (Márquez *et al.*, 2017).

10. Modelo de la Dinámica de Agregados del Suelo (DAS)

La dinámica de agregados en el suelo se ha venido estudiado usando el modelo de dinámica de agregados propuesto por (Márquez *et al.*, 2019) el cual permite determinar la distribución de agregados por tamaño, y estabilidad. Así como una serie de índices que permiten monitorear la dinámica del mismo a través de procesos de agregación, disrupción y desestabilización y su relación con la dinámica del carbono asociada a estos agregados. Este modelo estudia la dinámica de agregados en términos de los procesos que deben ocurrir para conducir el estado de un sistema de referencia hacia un nuevo estado. Los tres procesos básicos que caracterizan la dinámica de agregados del suelo son:

Disrupción: Ocurre cuando los macroagregados inestables ($> 250 \mu\text{m}$) se pueden fragmentar durante una perturbación y como resultado sus unidades constituyentes son redistribuidas en fracciones de tamaño más pequeño.

Estabilización/Desestabilización: Cuando los macroagregados estables ($> 250 \mu\text{m}$) permanecen en la misma fracción mientras que el sistema evoluciona del estado de referencia al nuevo estado.

Agregación: Cuando pequeñas unidades de agregados (partículas minerales, microagregados y/o macroagregados pequeños) pueden formar macroagregados grandes. Para evaluar la agregación se utiliza el “flujo-neto” a cada fracción. El flujo-neto representa el flujo neto de agregados incorporándose o desincorporándose de una fracción.

Índice de Disrupción de Agregados (DI): Es la cantidad relativa de macroagregados ($> 250\mu\text{m}$) que son inestables con respecto a la cantidad total de muestra de suelo, tal como se expresa en la (ecuación 1).

$$DI = \frac{U_1 + U_2}{T} \quad (1)$$

Donde:

U_1 : Cantidad de macroagregados inestables grandes (>2000 μm).

U_2 : Cantidad de macroagregados inestables pequeños (250-2000 μm).

T : Cantidad total de agregados.

***Índice de Formación de Macroagregados Estables Grandes ($FIS_{1,n+1}$) e
Índice de Formación de Macroagregados Inestables Grandes ($FIU_{1,n+1}$)***

$FIS_{1,n+1}$ es definido como la suma relativa de macroagregados estables grandes que resultan del proceso de agregación (ecuación 2); y $FIU_{1,n+1}$, la suma relativa de macroagregados inestables grandes que resultan del proceso de desagregación (ecuación 3).

$$FIS_{1,n+1} = \frac{x_1}{NF_{1+n+1}} \quad (2)$$

$$FIU_{1,n+1} = \frac{y_1}{NF_{1,n+1}} \quad \text{ó} \quad FIU_{1,n+1} = 1 - FIS_{1,n+1} \quad (3)$$

Donde:

x_1 : Cantidad de nuevos macroagregados estables grandes que se forman en la (Fracción 1) del nuevo estado.

y_1 : Cantidad de nuevos macroagregados inestables que se forman en la (Fracción 1) del nuevo estado.

NF_{1+n+1} : Flujo neto de los macroagregados grandes (>2000 μm).

Índice de Desestabilidad de Macroagregados Estables Grandes ($DMS_{1,n+1}$) e Índice de Estabilización de Macroagregados Grandes ($SSM_{1,n+1}$)

$DMS_{1,n+1}$ es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables de la (Fracción 1) del estado de referencia que pasan a ser inestables en el nuevo estado (ecuación 4), por otro lado, $SSM_{1,n+1}$ es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables de la (Fracción 1) en el estado de referencia que permanecen estables en la misma fracción en el nuevo estado (ecuación 5).

$$DMS_{1,n+1} = \frac{b_{1,n+1}}{S_{1,n}} \quad (4)$$

$$SSM_{1,n+1} = \frac{a_{1,n+1}}{S_{1,n}} \text{ ó } SSM_{1,n+1} = 1 - DMS_{1,n+1} \quad (5)$$

Donde:

$b_{1,n+1}$: Cantidad de macroagregados que permanecen como inestables en el nuevo estado (Fracción 1).

$a_{1,n+1}$: Cantidad de macroagregados que permanecen como estables en el nuevo estado (Fracción 1).

$S_{1,n}$: Cantidad total de agregados estables de la fracción 1 en el estado de referencia.

Índice de Formación de Macroagregados Estables Pequeños ($FIS_{2,n+1}$) e Índice de Formación de Macroagregados Inestables Pequeños ($FIU_{2,n+1}$)

$FIS_{2,n+1}$ es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables pequeños que resultan de la disrupción y agregación (ecuación 6), y $FIU_{2,n+1}$ como la cantidad de macroagregados inestables pequeños que resultan del proceso de desagregación (ecuación 7).

$$FIS_{2,n+1} = \frac{x_{2,n+1}}{(G_{2,n} + NF_{2,n+1})} \quad (6)$$

$$FIU_{2,n+1} = \frac{y_{2,n+1}}{(G_{2,n} + NF_{2,n+1})} \text{ ó } FIU_{2,n+1} = 1 - FIS_{2,n+1} \quad (7)$$

Donde:

$x_{2,n+1}$: Cantidad de nuevos macroagregados estables pequeños que se forman en la Fracción 2 del nuevo estado.

$y_{2,n+1}$: Cantidad de nuevos macroagregados inestables pequeños que se forman en la Fracción 2 del nuevo estado.

$G_{2,n}$: Cantidad de ganancias que obtiene la (Fracción 2) del nuevo estado procedente de la disrupción de macroagregados inestables grandes (Fracción 1) del estado de referencia.

$NF_{2,n+1}$: Flujo neto de los macroagregados pequeños (250-2000 μm).

Índice para la Desestabilización de Macroagregados Pequeños $DSM_{2,n+1}$ e Índice de Estabilización de Macroagregados Estables Pequeños $SSM_{2,n+1}$

$DSM_{2,n+1}$ es la cantidad relativa de macroagregados pequeños que permanecen en la (Fracción 2), que son estables en estado de referencia y se vuelven inestables en el nuevo estado (ecuación 8); mientras que $SSM_{2,n+1}$ es la cantidad relativa de macroagregados estables pequeños que permanecen en la (Fracción 2), que son estables en el estado de referencia y permanecen estables en el nuevo estado (ecuación 9).

$$DSM_{2,n+1} = \frac{b_{2,n+1}}{S_{2,n}} \quad (8)$$

$$SSM_{2,n+1} = \frac{a_{2,n+1}}{S_{2,n}} \quad \text{ó} \quad SSM_{2,n+1} = 1 - DSM_{2,n+1} \quad (9)$$

Donde:

$b_{2,n+1}$: Cantidad de macroagregados que permanecen como inestables en el nuevo estado (Fracción 2).

$a_{2,n+1}$: Cantidad de macroagregados que permanecen como estables en el nuevo estado (Fracción 2).

$S_{2,n}$: Cantidad total de agregados estables de la (Fracción 2) en el estado de referencia.

Índice de Agregación - Disrupción (ADI)

El ADI permite evaluar cualitativa y cuantitativamente la dinámica que conduce al sistema de suelo del estado de referencia al nuevo estado, el mismo se calcula usando la (ecuación 10). Cualitativamente, el signo del índice ADI señala si el proceso dominante que conduce al nuevo estado del sistema es la agregación o la disrupción, o ninguno de ellos; si es positivo (+), domina el proceso de agregación, si es negativo (-) domina el proceso de disrupción y si es cero (0), no domina ningún proceso. Cuantitativamente, el índice ADI es un número que está entre -1 y 1 ($-1 \leq ADI \leq 1$) y permite determinar la cantidad relativa de agregados que resultan de cualquiera de los dos procesos dominantes agregación y/o disrupción (Márquez *et al.*, 2019):

$$ADI = \frac{[A + a] - [DI_n + d]}{T} \quad (10)$$

Donde:

A : Cantidad total de agregados que resultan de la agregación.

d : Cantidad de agregados que constituyen unidades resultado de disrupción adicional.

DI_n : Índice de disrupción.

T : Cantidad total de suelo.

α : Cantidad neta de agregados en la (Fracción 2) que resultan de la disrupción de macroagregados inestables grandes. La disrupción adicional es definida en la (ecuación 11).

$$\alpha = x_2 + y_2 \quad \text{Si} \quad NF_2 < 0 \quad \text{o} \quad \alpha = G_2 \quad \text{Si} \quad NF_2 \geq 0 \quad (11)$$

En la (ecuación 12)

$$x_2 = x_{2G} + x_{2NF} \quad \text{y} \quad y_2 = y_{2G} + y_{2NF}. \quad (12)$$

Cuando $ADI > 0$ el medio que domina el proceso es la agregación, si $ADI = 0$ no domina ninguno y cuando $ADI < 0$ la disrupción es el proceso dominante que conduce el sistema al nuevo estado (Figura 1).

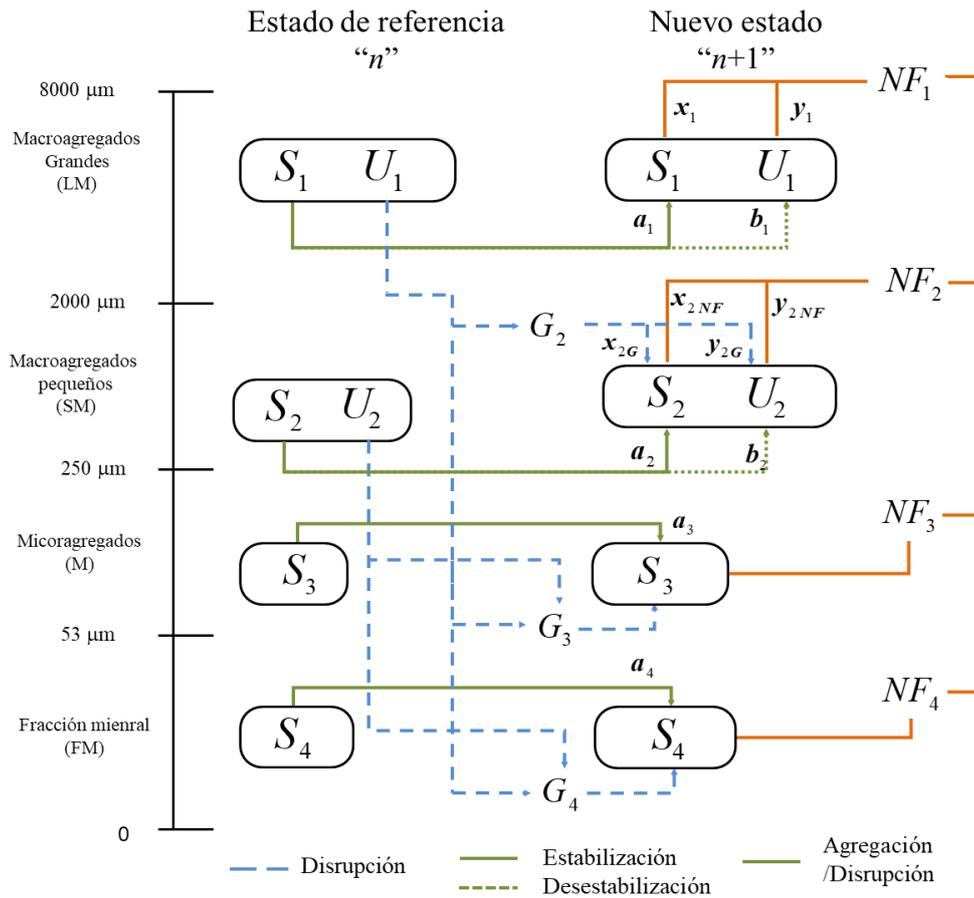


Figura 1. Dinámica de Agregados en el Suelo (DAS).

(S = agregados estables; U = agregados inestables; NF = flujo neto; G = ganancias; x = nuevos macroagregados estables cuando $NF > 0$; y = nuevos macroagregados inestables cuando $NF > 0$; a = macroagregados estables que permanecen como estables y b = macroagregados estables que se desestabilizan; n = estado de referencia; n+1 = nuevo estado.

Propuesto por: (Márquez *et al.*, 2019)

METODOLOGÍA

1. Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada al noreste del cantón Chambo en la zona de transición entre los límites de páramo y la zona de cultivos en la comunidad San Pedro de Lluccud, la zona de estudio abarca una superficie de 628,63 ha, con un rango altitudinal que va desde los 3000 hasta los 3800 m.s.n.m. La precipitación en el área de estudio varía entre 658,4 y 802,8 mm/añual y una temperatura media entre 12,8 y 15,4 °C (Ojeda, 2017).

En el área predominan suelos del orden molisol (suelos con saturación de bases >50% de cationes intercambiables como Ca y Mg en el suelo). Estos suelos se encuentran sobre la formación geológica “El Altar” constituido por cuerpos intrusivos de diorita, diques de andesitas y riolacitas, flujos de lava andesítica y andesítico basálticas (Cornejo, 2017). La zona de estudio corresponde al “Bosque Siempre Verde Montano Alto de los Andes Orientales” de la sierra central del Ecuador (Figura 2) (Ojeda, 2017).

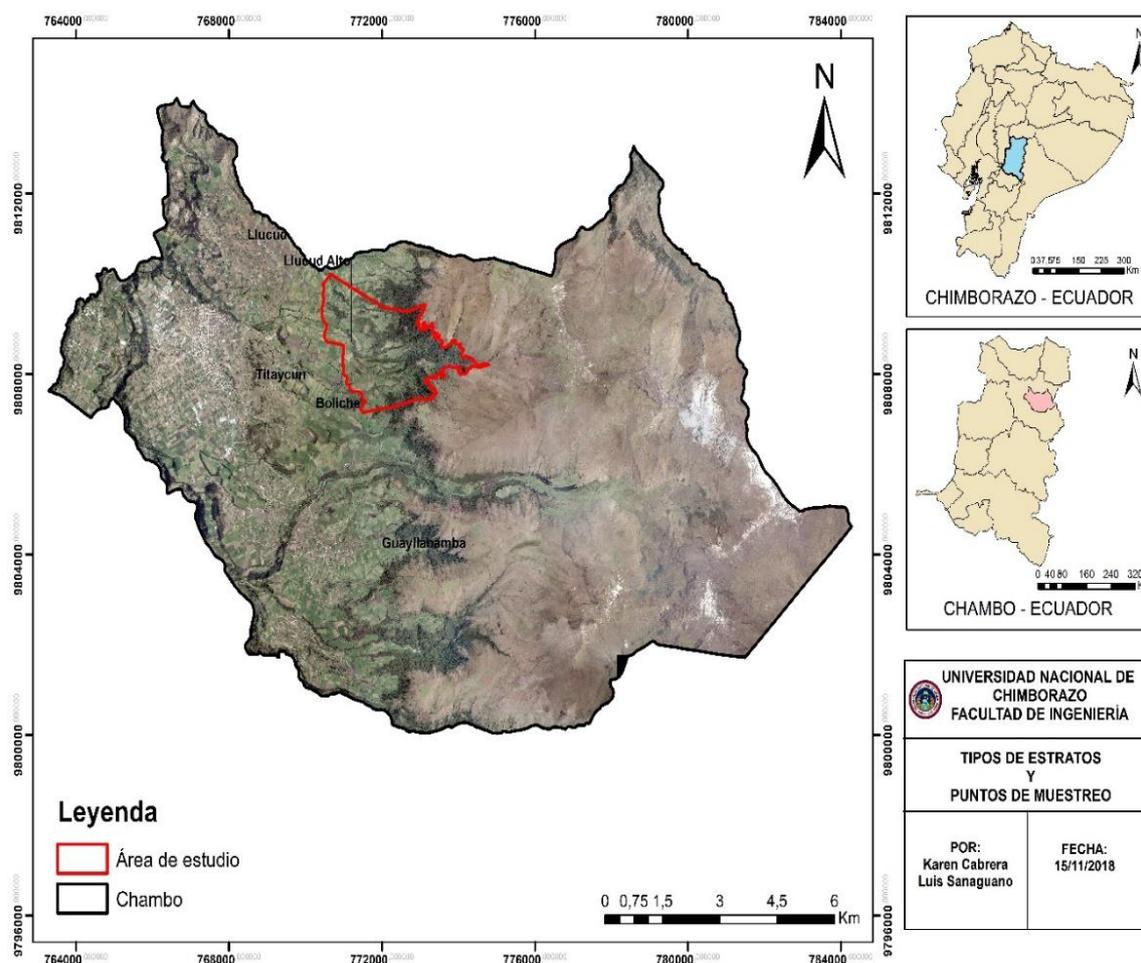


Figura 2. Ubicación del área de estudio “Bosque Siempre Verde Montano Alto de los Andes Orientales”.
Elaborado por: Los Autores

2. Determinación de Conglomerados de Muestreo

El diseño experimental fue en bloques al azar. Se establecieron 6 conglomerados (C) de 3 parcelas (P) c/u, en forma de “L” con una dimensión de 60 x 60 m y una distancia entre parcelas de 250 m (Figura 3). Dentro de cada parcela se establecieron subparcelas de 20 x 20 m, para recolectar muestras de suelo a una profundidad de 0 – 30 cm (Eyherabide, Saínz Rozas, Barbieri, & Echeverría, 2014). Cada conglomerado es una replicación y los tratamientos fueron en la vegetación de bosque y pasto.

Para el muestreo en campo se consideraron 6 de los conglomerados del proyecto de investigación de (Ojeda, 2017).

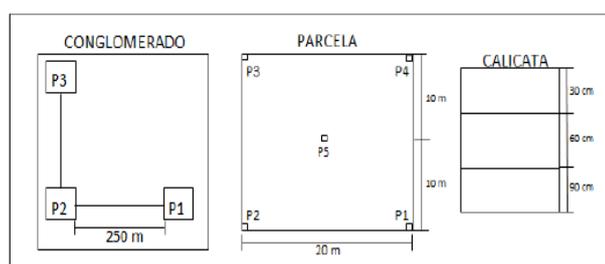


Figura 3. Parcelas permanentes de muestreo

Propuesto por: (Eyherabide, Saínz Rozas, Barbieri, & Echeverría, 2014)

3. Recolección de Muestras de Suelo

En la sub-parcela de 20 x 20 m, se establecieron cinco puntos de muestreo, distribuidos uno en el centro y en cada extremo de los cuatro vértices (Figura 3). En el punto central de la parcela se observó el color, textura y estructura del suelo siguiendo la guía de descripción de perfiles de Vargas, (2009). Se tomaron muestras a una sola profundidad (0-30 cm); la primera compuesta de suelo extraído de los cinco puntos de muestreo, esta alícuota sirvió para la distribución de agregados por tamaño, estabilidad, determinación de carbono orgánico y caracterización del suelo. La segunda alícuota se obtuvo de la extracción de suelo por medio de un cilindro de volumen 72.6 cm^3 , y se destinó para cálculo de densidad aparente.

4. Caracterización del Suelo

De acuerdo a la “Guía para la Descripción de Suelos” Vargas, (2009) se caracterizó cada estrato, bosque y pasto con los siguientes parámetros: pH, color, textura, densidad aparente y humedad relativa.

4.1 pH

Las mediciones se realizaron con pHmetro combinado con cuerpo de epoxy (Thermo Scientific_9165NWP). La calibración del equipo se realizó con soluciones buffer de pH 7 y 4, acorde a lo indicado por el fabricante. Para esto se pesaron 10 g de suelo y se les agregó 25 mL de agua desionizada. La mezcla suelo: agua se agitó durante 30 minutos y el pH se midió en el sobrenadante sin agitar (Beretta, Bassahum, & Musselli, 2014).

4.2 Color

El color se realizó mediante las notaciones para matiz, value y chroma como se da en la Carta o en Tabla de Colores de Suelo Munsell (Munsell, 2016), para suelo en estado seco y húmedo y se registró el código del color en cada muestra de ambos estratos.

4.2 Textura

La clase textural, se lo realizó a través de pruebas organolépticas en estado húmedo, mediante el diagrama de flujo (*Aflow diagram for teachig texture-by-feel analysis. Journal of agronomic education, 1979*).

4.3 Densidad Aparente

Para el cálculo de la densidad aparente se tomaron muestras de suelo *in situ* a través de un cilindro metálico con un volumen conocido de $72,6 \text{ cm}^3$ sin disturbar la estructura natural del suelo (Vargas, 2009), luego aplica un secado a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas, y se determina por diferencia de pesos para conocer la masa como se muestra en la (ecuación 13):

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{masa (gramos)}}{\text{volumen (cm}^3\text{)}} \quad (13)$$

4.4 Humedad Relativa

La humedad relativa se determinó mediante el método de (Chocobar *et al.*, 2013) a través de la diferencia de pesos, mediante la (ecuación 14):

$$\text{Porcentaje de Húmedad} = \frac{W \text{ húmedo} - W \text{ seco}}{W \text{ húmedo}} * 100 \quad (14)$$

Donde:

W_{seco} : Peso Seco

$W_{húmedo}$: Peso Húmedo

4.5 Superficie Específica (Se)

Para la determinación de la superficie específica (Se) se añadió intervalos de volumen fijo con azul de metileno a una suspensión de suelo, hasta alcanzar el punto máximo de floculación. En este punto se asume que se ha logrado cubrir con azul de metileno toda la superficie del suelo y la (Se) se calculó mediante la (ecuación 15) (Narsilio & Santamarina, 2015):

$$Se = \frac{W_{AM} * \frac{1}{V_{SAM} * W_{muestra}} * V_{AM} * A_{AM} * \frac{1}{P_{AM}} * N_{av}}{\quad} \quad (15)$$

Donde:

Se (m^2/g): Superficie específica.

W_{AM} (g): Masa en peso de azul de metileno.

V_{SAM} (ml): Etiqueta para el volumen de la solución de azul de metileno.

$W_{muestra}$ (g): Masa en peso de la muestra.

V_{AM} (ml), Volumen de azul de metileno añadido

A_{AM} (m^2/mol): Área cubierta por un catión de azul de metileno.

P_{AM} (g/mol): Peso molecular del azul de metileno.

N_{av} (moléculas/mol): Número de Avogadro.

n : Número de veces que se dispensó la gota de azul de metileno a la solución hasta alcanzar el punto de floculación.

Valores constantes: $W_{AM} = 0.80$ g; $V_{SAM} = 250$ ml; $W_{muestra} = 0.50$ g; $W_{AM} = n * (0.5$ ml).

$A_{AM} = 1.3 \times 10^{-18} m^2/molécula$; $P_{AM} = 319.79$ g/mol; $N_{av} = 6.022 * 10^{23}$ moléculas/mol.

4.6 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En la determinación de la CIC se utilizó el procedimiento que se describe a continuación (Narsilio & Santamarina, 2015):

1. Se preparó una solución acuosa de Azul de Metileno mezclando 1,0 g de polvo seco en 200 ml de agua desionizada.

2. Se preparó una suspensión de suelo mezclando 0,5 g de suelo secado a horno en 30 ml de agua desionizada.
3. Se agregó la solución de Azul de Metileno a la suspensión de suelo en incremento de 0,5 ml y se mezcló la suspensión durante un minuto para dar tiempo al catión AM de ser absorbido sobre la superficie mineral, reemplazando los cationes en la capa difusa.
4. Colocamos una gota de la suspensión sobre el papel filtro, la gota se absorbe por capilaridad formando una marca circular. El ensayo se terminó una vez que un halo azul claro se forma concéntricamente alrededor de la gota sobre el papel.
5. La CIC se calculó usando la expresión en la (ecuación 16):

$$CIC = \frac{V_{AM}}{W_{MUESTRA}} \quad (16)$$

Donde:

CIC (meq/100 g de suelo): Capacidad de intercambio catiónico.

V_{AM} (ml): Volumen total de la solución de azul de metileno, dispensada a la suspensión.

$W_{MUESTRA}$ (g): Masa expresada en peso de la muestra.

5. Determinación de Agregados por Distribución Tamaño – Estabilidad

Se realizó siguiendo el procedimiento descrito por (Márquez *et al.*, 2019). Para cada muestra compuesta se tomaron dos submuestras de 100 g c/u, para ser usadas en la determinación de la distribución de agregados por tamaño.

5.1 Tratamiento Seco

Una de las submuestras de 100 g luego de ser secada al aire, se aplicó directamente un tamizado húmedo. Para este último, cada muestra fue sumergida en 1200 ml de agua destilada por 5 min pasándose por tres tamices, donde se aplicó un número diferente de movimientos: Tamiz de 2000 μm ó 2 mm con una secuencia de 50 movimientos, uno de 250 μm con 35 movimientos y por último uno de 53 μm con 10 movimientos (Figura 4), posteriormente toda la fracción retenida en cada tamiz, se colocó en bandejas (aluminio) y luego llevadas a la estufa a 60 °C por un tiempo de 24 horas, para su secado y posteriormente pesado.

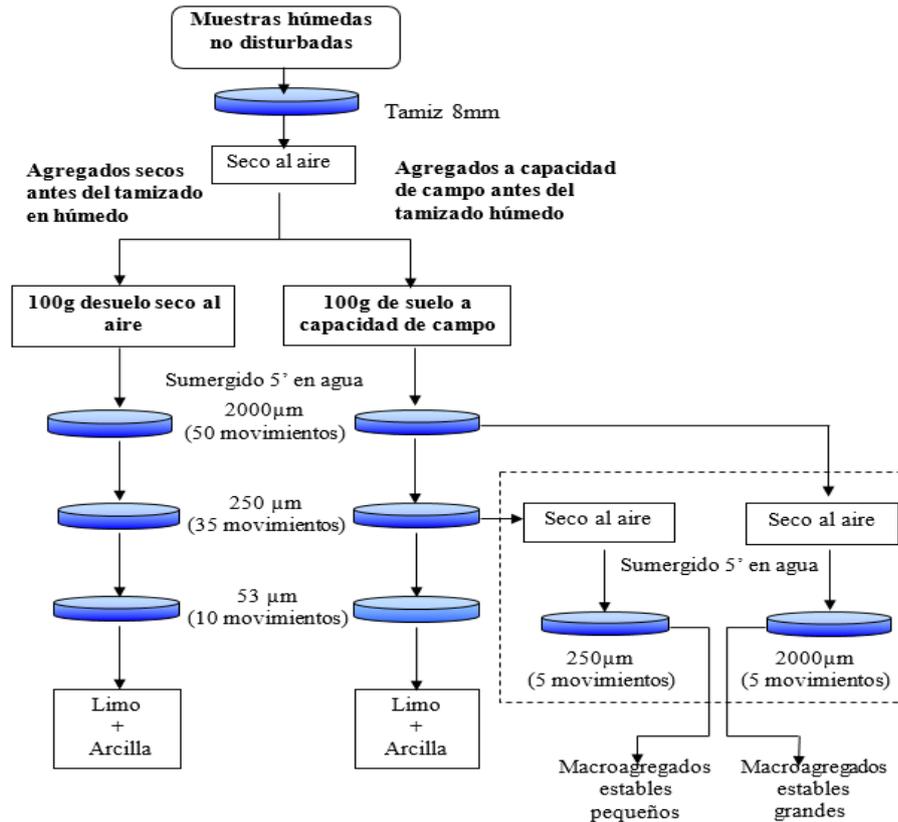


Figura 4. Procedimiento para evaluar distribución y estabilidad de los agregados. Propuesto por: (Márquez, García, Schultz, & Isenhardt, 2019)

5.2 Tratamiento Húmedo

La otra submuestra se llevó a capacidad de campo, para lo cual, esta se colocó en un recipiente (plástico) un papel filtro en su interior y se agregó aproximadamente 25 ml de agua destilada, distribuyendo el agua uniformemente. Posteriormente esta fue colocada en un refrigerador a 4 °C durante 12 horas. A continuación, se aplicó el tamizado en húmedo, luego la muestra fue sumergida en 1200 ml de agua durante 5 min, realizándose el tamizado de igual manera que en el tratamiento seco, posterior al tamizado, toda la fracción fue secada en una estufa a 60 °C por 24 horas, para su posterior secado (Figura 4).

La determinación de la distribución de la estabilidad del tamaño del agregado involucra los supuestos de que los agregados del suelo que pueden clasificar en términos de tamaño y estabilidad al agua. Por lo tanto:

1. Los agregados de suelo con diámetros de $>250 \mu\text{m}$ están etiquetados como macroagregados.

2. Los macroagregados son categorizados como macroagregados grandes cuando sus diámetros son $> 2000 \mu\text{m}$ (Fracción 1) y macroagregados pequeños cuando sus diámetros están entre el rango 250 y $2000 \mu\text{m}$ (Fracción 2).
3. Los macroagregados son también categorizados en términos de su resistencia al agua. Macroagregados que sobreviven al agua se clasifican como macroagregados estables y los que no sobreviven al agua son llamados macroagregados inestables.
4. Los microagregados tienen diámetros que oscilan entre 53 y $250 \mu\text{m}$ (Fracción 3).
5. La fracción mineral (limo + arcilla) tiene diámetros, $<53 \mu\text{m}$ (Fracción 4).

6. Análisis Estadístico

Se realizaron pruebas de normalidad para verificar los supuestos del análisis ANOVA, agrupando los datos por fracciones de agregados estables e inestables y el contenido de carbono asociado a estas fracciones. Se realizó un ANOVA de una sola vía ($p < 0,05$), para detectar diferencias estadísticas entre tratamientos se realizará la prueba de medias de Tukey. Para el análisis estadístico se usó el software MINITAB V17 (Minitab, 2016).

Para estudiar la dinámica de los agregados del suelo se utilizó el modelo teórico conceptual de la Dinámica de Agregados del Suelo (DAS). El mismo permitió hacer comparaciones entre dos diferentes usos de la tierra seleccionados en este estudio. Se tomó como estado de referencia el suelo bajo (Bo) para compararlo con los suelos (Pa) y se tomaron los valores de los agregados estables e inestables de la distribución de la estabilidad por tamaño de fracción. Los tres procesos básicos son disrupción, agregación y desestabilización (Figura 1).

7. Determinación del Contenido de Carbono Orgánico Asociado a los Agregados

Las muestras se analizaron por métodos convencionales a partir de la fracción fina del suelo. Los valores de carbono total (CT) se obtuvieron por el método *Dumas* en un Analizador *Elemental Total Flash 2000 (Thermo Scientific)*. Se pesaron entre 20 y 50 mg de suelo con una balanza analítica *OAHUSPA224C*, previamente secado a temperatura ambiente y tamizado a $150 \mu\text{m}$. Las muestras se calcinaron en el analizador elemental *Thermo Scientific Flash 2000* a $950 \text{ }^\circ\text{C}$ usando oxígeno como agente oxidante (AOAC, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Estratificación y Establecimiento de Conglomerados de Muestreo

En la Figura 5, se muestra el área de estudio, donde se usaron puntos de muestreo seleccionados en estudios previos realizados por (Ojeda, 2017). En el Anexo 1, se reportan las áreas de muestreo con sus correspondientes coordenadas. Las áreas donde se realizó el estudio corresponden a un área que ha permanecido bajo bosque (Bo) y un área que fue remplazada por pastizal (Po). Se establecieron tres conglomerados en cada uno de los tratamientos, lo que dio un total de 18 parcelas permanentes de muestreo.

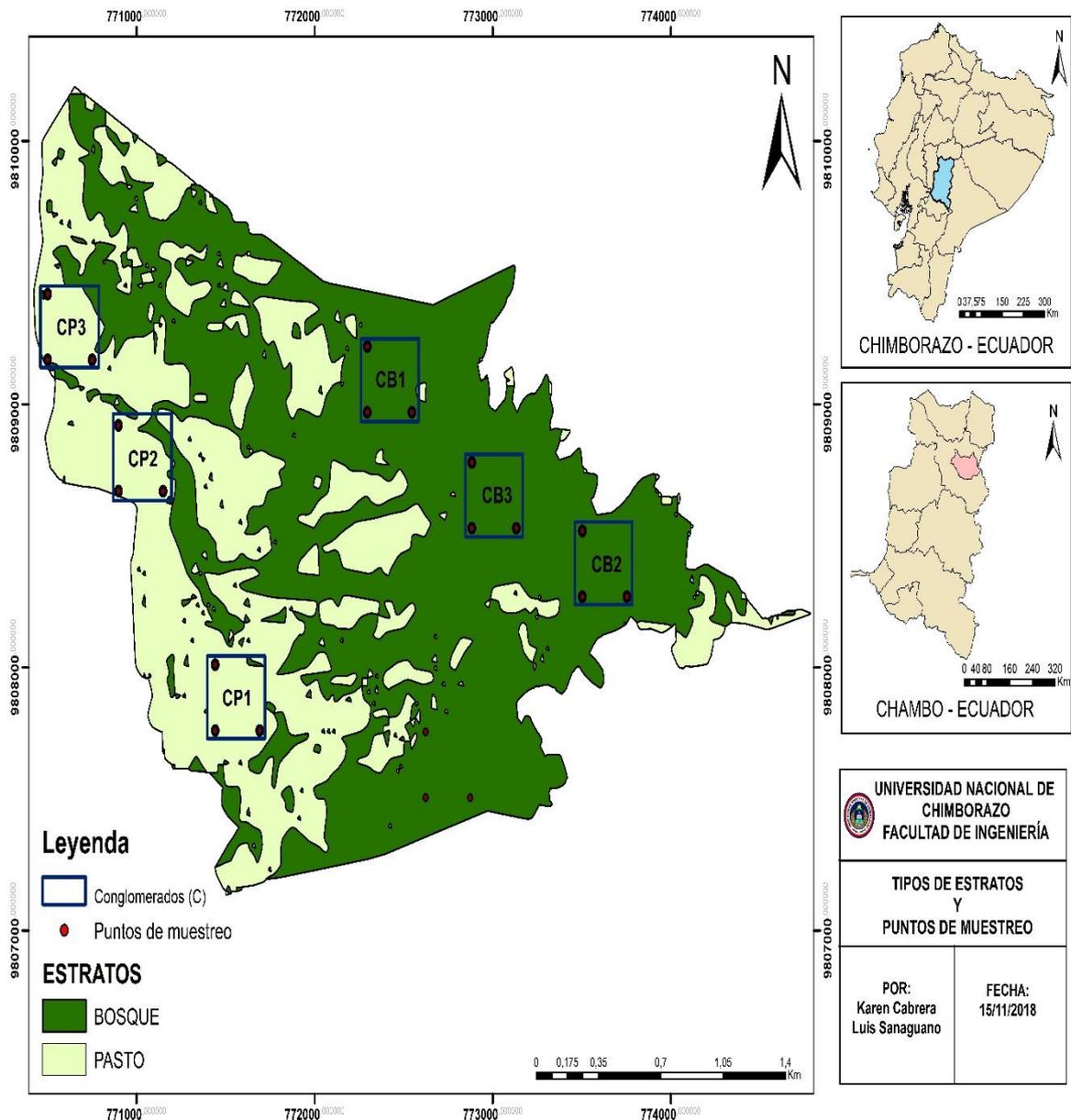


Figura 5. Tipos de Uso (Bosque y Pasto) y Establecimiento de Conglomerados de Muestreo.
Elaborado por: Los Autores

2. Caracterización del Suelo

2.1 pH

El análisis de varianza permitió determinar que a pesar que existe una ligera diferencia en los valores de pH en los suelos bajo Bo y Pa, con un promedio de 5 y 6 respectivamente, estos son significativamente diferentes entre sí ($p < 0,05$) (Figura 6). Los resultados de los valores de pH y el análisis de su varianza muestran que el cambio de uso de Bo a Pa causo cambios ligeros cambios en los valores de pH. Esto debe estar asociado a el tipo de suelo. Ambos suelos pertenecen al orden Molisol, que se caracteriza por presentar una saturación de bases mayor al 50%, lo que determina de manera directa los posibles valores de pH (Quishpe, 2017).

Estos valores de precipitación generan condiciones para que los procesos de lixiviación de los nutrientes sean moderados y esto guarda una relación directa con los valores de pH. Estos suelos por ser de evolución moderada tienen una mayor resiliencia a los cambios de pH. Contrariamente a estos resultados, contrastan los reportados por (González & Dezzeo, 2010) donde se compara el efecto del cambio de bosque a pastizal sobre las características del suelo en el que reportan una variación del pH en suelos bajo pasto con respecto al bosque nativo. Sin embargo, en este estudio los suelos pertenecían al orden Alfisol, que se caracterizan por presentar mayor evolución, con una saturación de bases mayor al 35%. El ligero incremento de los valores de pH en suelos bajo el uso de Pasto se debe al uso de fertilizantes, mientras que en suelos bajo Bosque el tipo de materia orgánica y su descomposición puede producir una ligera acidificación en estos suelos debido al tipo de materia orgánica.

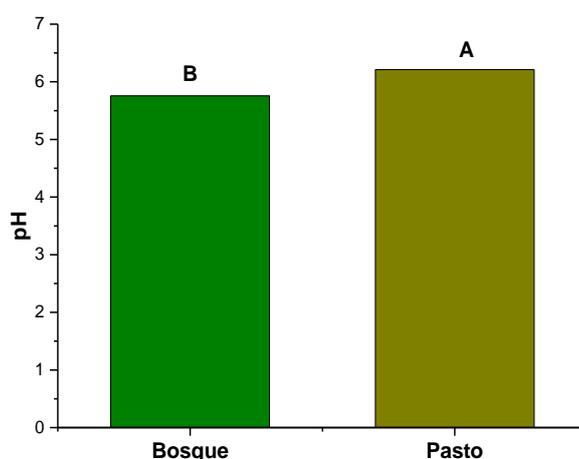


Figura 6. Valores de pH de Estratos, Bosque y Pasto.
Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
Elaborado por: Los Autores

2.2 Color

El color es una de las característica morfológicas más importantes, fácil de determinar y relevante en la identificación taxonómica. El color de los suelos guarda una relación con los componentes sólidos (materia orgánica, textura). El color de las muestras de los suelos estudiados correspondió en su mayoría al matiz (hue) 10YR, tanto en los horizontes superficiales como en profundidad. La luminosidad (value) de los horizontes en suelos bajo bosque fue igual o menor que 2 en casi todos los suelos, mientras que en suelos bajo pasto el valué fue más alto indicando colores más claros (Figura 7). La intensidad (chroma) en suelo bajo Bo fue de (1 – 2) y en suelos bajo Pa (2 – 3). Estos valores de intensidad y luminosidad en suelos bajo bosque indican colores más oscuros, resultando en contenidos de materia orgánica más altos. Mientras que los valores de luminosidad e intensidad en suelos bajo pasto son más claros indicando posiblemente menores valores de carbono orgánico. Valores similares fueron reportados por (La Manna, 2005) quien reporto valores con luminosidad e intensidad más bajas para suelo bajo vegetación boscosa. Otra característica importante que se deriva de los colores es la carencia de moteados lo que indica que estos suelos son moderadamente bien drenados y no presentan signos de hidromorfismo.

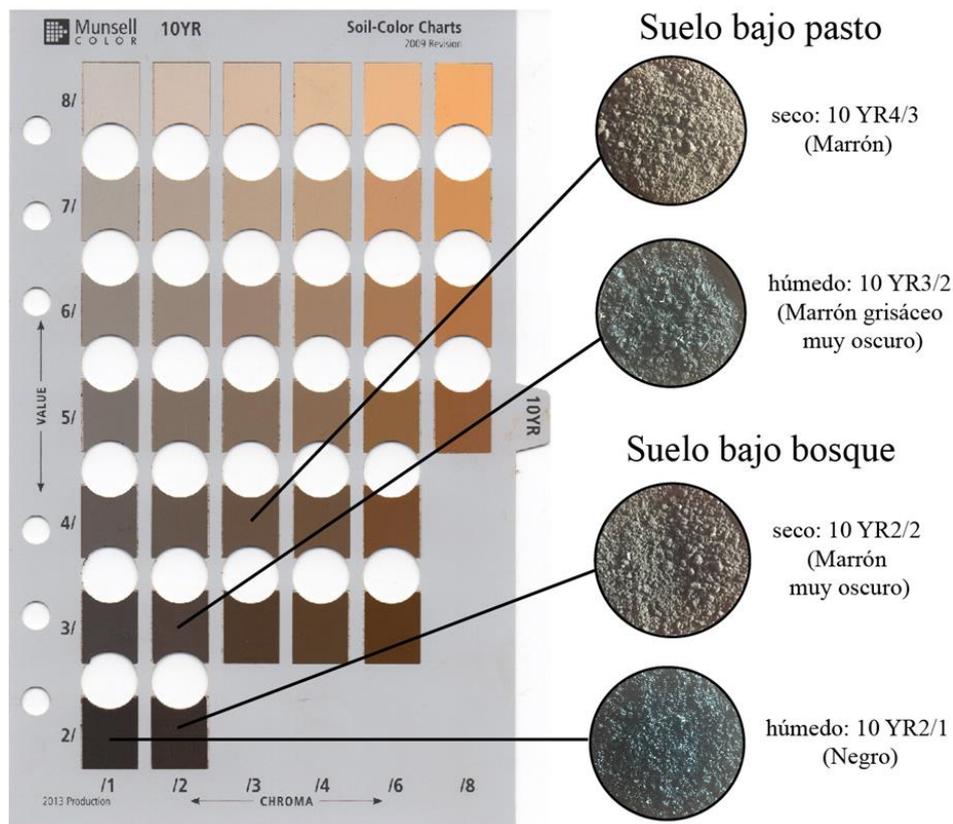


Figura 7. Color de los Suelos bajo Bosque y Pasto
Elaborado por: Los Autores

2.3 Textura

Se observó que las muestras predominan a la clase textural Franco arcilloso (FA) para ambos estratos. Además se encontró una mínima presencia de suelo Franco Limoso (FL), Arcilloso (A) y Franco Arcillo Limoso (FAL) en el estrato de Bo, mientras que en Pa en menor cantidad un tipo de suelo Arcilloso (A) (Figura 8). Con ello se puede afirmar que la textura de ambos estratos proviene del mismo material parental presentando una mineralogía similar que da origen a una textura de grano fino a grano medio.

La textura del suelo es una de las propiedades del suelo que no cambia por el manejo del mismo (Brady & Weil, 2015); sin embargo, en un proceso de deforestación, los horizontes se pueden perder por erosión, y en algunos casos, el horizonte B rico en materiales arcillosos pueden aflorar (Bautista, Gutiérrez, Castillo, & Etchevers, 2005).

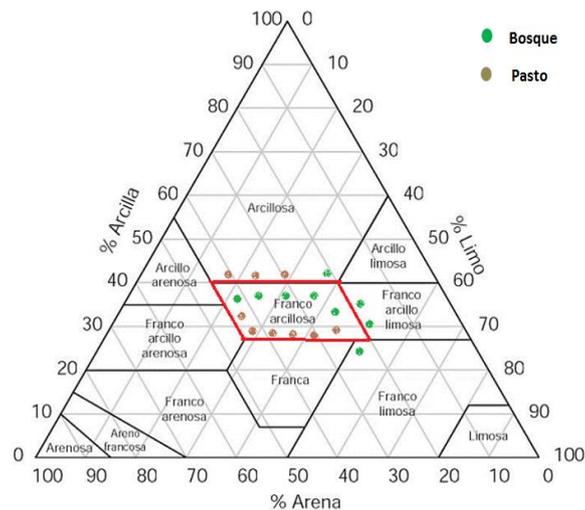


Figura 8. Clases Texturales de los Estratos, Bosque y Pasto
Elaborado por: Los Autores

2.4 Densidad Aparente (DA)

En la Figura 9, se muestra que los valores de DA fueron significativos ($p < 0,05$) con un promedio de Bo de $0,949 \text{ g/cm}^3$ en relación a Pa, con una media de $1,088 \text{ g/cm}^3$. El aumento de DA es debido al cambio de uso de suelo. Cuando la DA del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces (Jiménez, 2014).

A pesar que la Da en los suelos bajo Pasto incrementó, este todavía presenta una Da ideal esto puede estar relacionado con el aporte de manera anual de las raíces finas y la materia

orgánica. Los reportes de aumentos de DA en suelos bajo pastoreo continuo son frecuentes en la literatura, sin embargo (González y Dezzeo, 2010) reportan que el hecho de que estos valores no hayan cambiado notoriamente entre Bo y Pa, parece indicar que a estos pastizales se les está dando un manejo adecuado y probablemente no están siendo utilizados en forma intensiva.

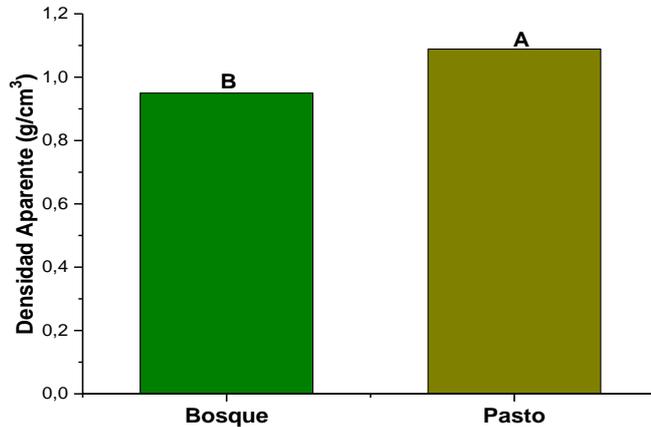


Figura 9. Densidad Aparente en Suelos bajo Bosque y Pasto.
Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
Elaborado por: Los Autores

2.5 Humedad Relativa (HR%)

El contenido de humedad entre ambos estratos es significativo ($p < 0,05$) y este depende de la vegetación y de la capacidad de campo del mismo, obteniendo como resultado bajo Bo un porcentaje de 61 % con relación a Pa que fue de 49 %. La disminución del contenido de humedad se debe al incremento de DA con ellos se reduce el espacio poroso, en lo que se refiere a Bo presentan más cantidad de materia orgánica lo cual refleja una mayor porosidad en función a sus texturas arcillosas (Figura 10).

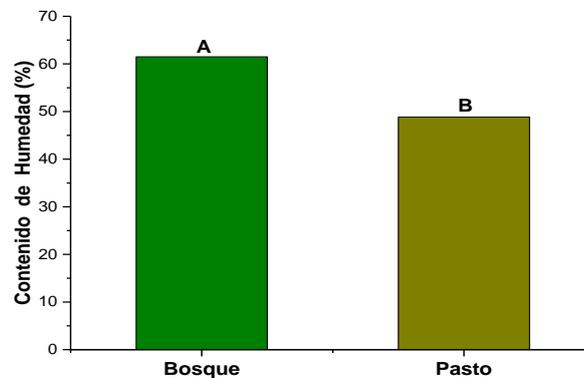


Figura 10. Contenido de Humedad en los Estratos, Bosque y Pasto.
Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
Elaborado por: Los Autores

2.6 Superficie Específica (Se)

La superficie específica de los suelos es un indicador de la capacidad que tienen los suelos de adsorber cationes. En la Figura 11, se observa que el estrato Pa tienen una mayor capacidad de adsorción debido a su textura arcillosa y franco arcillosa que se encuentran cargadas negativamente con un valor de $116,89 \text{ m}^2/\text{g}$ a diferencia del Bo que tiene un $86,99 \text{ m}^2/\text{g}$ de capacidad de intercambiar cationes, esto quiere decir, que a mayores proporciones de arcilla existe una mayor capacidad de intercambio catiónico (Brady & Weil, 2015).

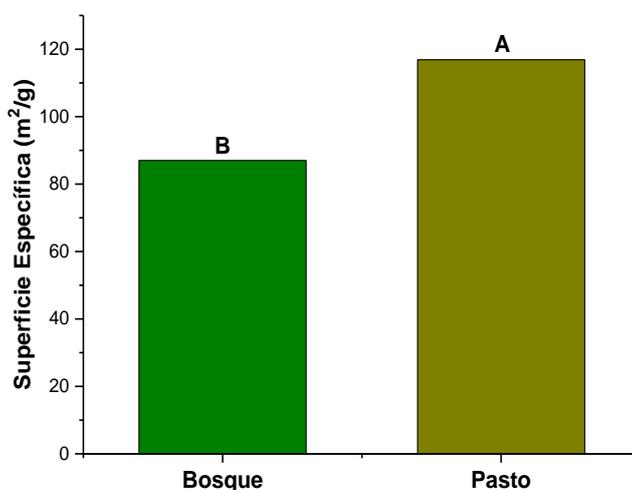


Figura 11. Superficie Específica en función a los Estratos, Bosque y Pasto
Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
Elaborado por: Los Autores

3. Distribución de Agregados por tamaño y estabilidad del suelo bajo Bosque y Pasto

3.1 Distribución de Agregados por Tamaño

Los resultados del fraccionamiento en seco se muestran en la Figura 12 y Tabla 1. Se observa que en los suelos bajo Bo los macroagregados grandes ($>2000 \mu\text{m}$) representan el 82% y estos valores son significativamente diferentes a los de pasto con el 85%, la cantidad de macroagregados estables pequeños ($250 - 2000 \mu\text{m}$) fue significativamente mayor el Bo al contrario del Pa con el 15% y el 11%, respectivamente. También se puede observar que la cantidad de microagregados ($53 - 250 \mu\text{m}$) y la fracción mineral ($<53 \mu\text{m}$) no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$).

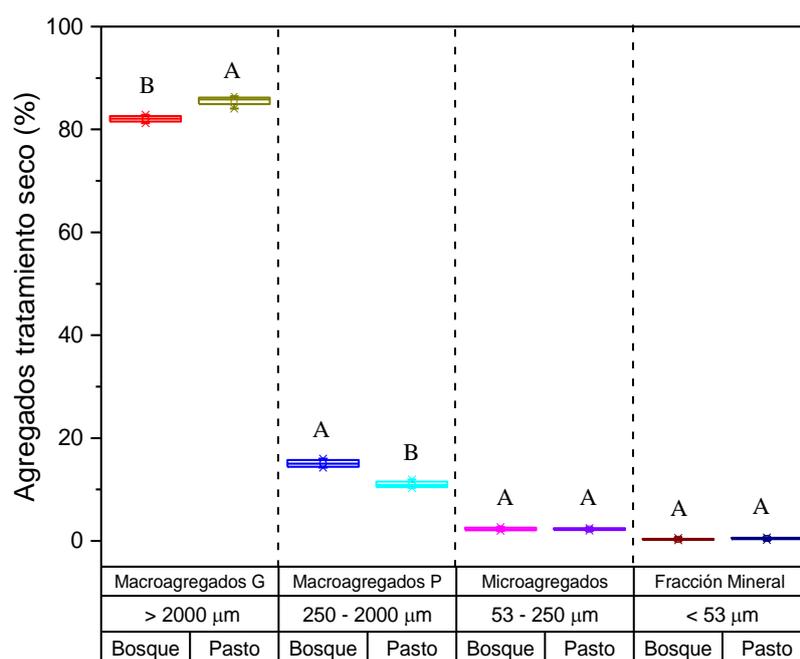


Figura 12. Distribución de Agregados bajo Bosque y Pasto (Tratamiento seco)
 Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
 Elaborado por: Los Autores

La cantidad de macroagregados del fraccionamiento en húmedo en suelos bajo Bo fue significativamente mayor en macroagregados grandes ($>2000 \mu\text{m}$) con un 97% mientras que los suelos bajo Pa fue del 95%. En los macroagregados pequeños el porcentaje en Bo es del 2% con respecto al Pa que es de 4%, siendo este último significativamente diferente. Igual que el tratamiento en seco no se observan diferencias significativas para las fracciones en microagregados y fracción mineral (Figura 13) y (Tabla 1).

En el área bajo Bo, este presenta una leve perturbación lo que permitió la formación y estabilización de macroagregados grandes, a diferencia de los suelos bajo Pa, en esta zona existe una alteración en el mismo debido a la labranza y poca presencia de zonas cercanas de cultivo lo que conlleva a la desestabilización de los agregados, pero debido a su sistema de enraizamiento estos favorecen a la formación de agregados, por ello esta alteración es imperceptible. Por tanto, estos suelos tienen una mayor resiliencia a los cambios. Resultados similares fueron reportados por (García, Márquez & López, 2010).

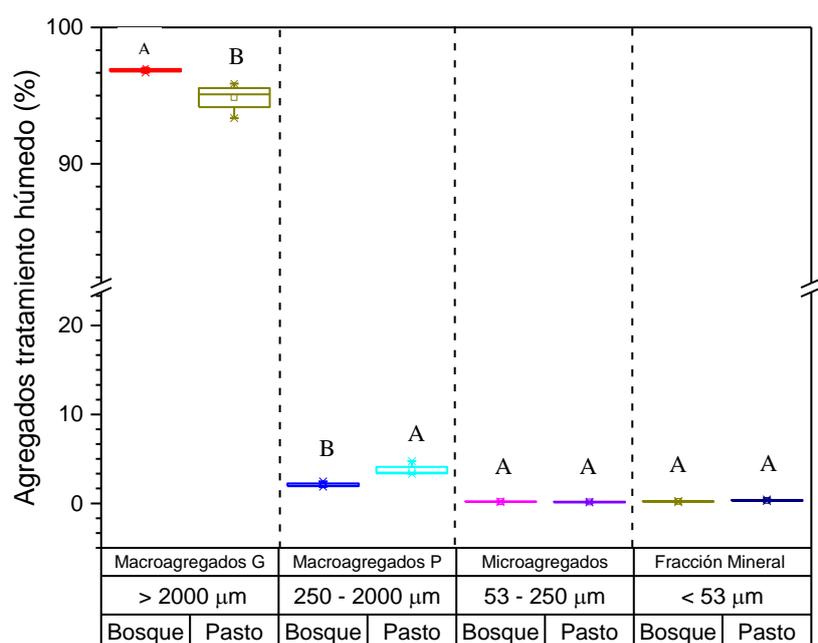


Figura 13. Distribución de Agregados bajo Bosque y Pasto (tratamiento húmedo)
 Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
 Elaborado por: Los Autores

Tabla 1. Análisis de Varianza de la Comparación de la Proporción de Agregados Estables e Inestables en cada Fracción de Agregados de Bosque (BO) y Pasto (PA).

Variable	ANOVA p Valor	Media Bosque	Media Pasto	Error estándar	Contraste BO vs. PA
Fraccionamiento en Seco (%)					
>2000 µm	0.001	82.08	85.55	0.87	PA>BO
250–2000 µm	0.000	15.08	11.02	0.75	BO>PA
53–250 µm	0.949	2.32	2.31	0.26	NS
<53 µm	0.223	0.30	0.48	0.19	NS
Fraccionamiento en Húmedo (%)					
>2000 µm	0.010	96.85	94.86	0.77	BO>PA
250–2000 µm	0.004	2.09	3.74	0.51	PA>BO
53–250 µm	0.243	0.18	0.15	0.04	NS
<53 µm	0.082	0.22	0.32	0.07	NS

El texto en negrita indica significado al nivel de 0.05, NS indica que no es significativo si $p > 0.05$. Los agregados que sobreviven al slaking se etiquetan como estables y los que no sobreviven se etiquetan como inestables.

Elaborado por: Los Autores

3.2 Distribución de Agregados por Estabilidad

La relación entre la cantidad de macroagregados estables grandes fue 82% y de macroagregados pequeños del 1% en el estrato Bo, al contrario de suelos bajo Pa este fue

del 86% en macroagregados grandes y de macroagregados pequeños del 3%. Se observa que en ambos suelos bajo Bo y Pa predominan los agregados estables. Esto se debe a que estos suelos pertenecen al Orden Molisol el cual se caracteriza por presentar altos contenidos de materia orgánica que contribuyen a la estabilidad de los agregados (Figura 14).

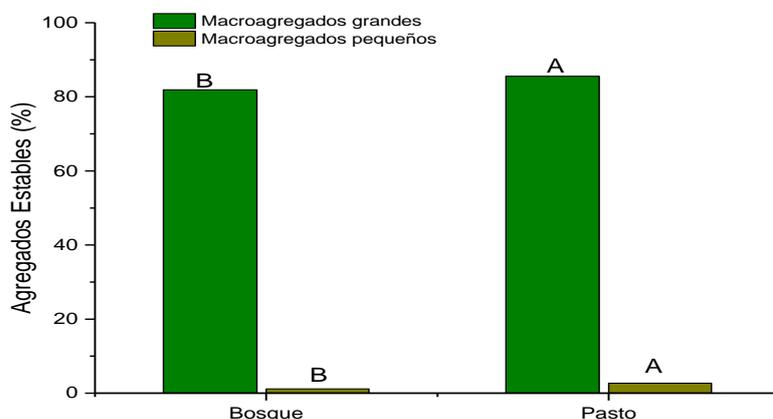


Figura 14. Distribución de Agregados Estables bajo Bosque y Pasto.
 Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
 Elaborado por: Los Autores

3.2.1 Distribución de Agregados Inestables

La diferencia entre los valores de macroagregados inestables grandes corresponde al 15% y al 1% de macroagregados inestables pequeños en función al Bo, en cuanto al Pa se obtuvo un valor correspondiente al 9% de macroagregados grandes y al 1% en macroagregados pequeños (Figura 15).

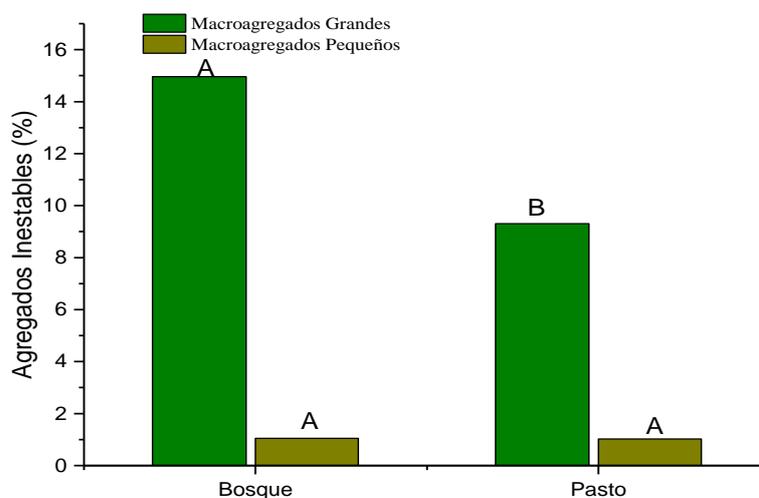


Figura 15. Distribución de Agregados Inestables bajo Bosque y Pasto.
 Letras (A, B): indican diferencias significativas mediante el test de Tukey ($p < 0.05$)
 Elaborado por: Los Autores

El cambio de uso de suelo en esta zona no modificó la proporción relativa en la mayoría de los tamaños de los agregados tanto en Bo como en Pa, mientras que los macroagregados inestables grandes muestran diferencias significativas mayores. Lo cual trae como consecuencia que estos macroagregados se redistribuyan en las fracciones inferiores. Esto está relacionado con la resiliencia que tiene estos suelos ya que tienen altos contenidos de materia orgánica y una textura franco arcillosa que mantiene los macroagregados grandes estabilizados.

4. Índices de Estabilidad de Macroagregados Estables e Inestables del Suelo bajo Bosque y Pasto.

4.1 Índice de Formación de Macroagregados Estables e Inestables (FIS o FIU)

Posterior a la alteración producida en el estrato Bosque (Bo) a un nuevo sistema, es decir, los suelos bajo Pasto (Pa) se crea un nuevo equilibrio, los resultados indican una menor formación de Macroagregados estables grandes FIS_{n+1} igual a 28% y una mayor cantidad de macroagregados inestables grandes FIU_{n+1} de 72%, en cambio se produjo una mayor formación de macroagregados estables pequeños en FIS_{n+1} de 61% y una menor cantidad de agregados inestables pequeños FIU_{n+1} de 40% (Tabla 2).

Esta formación de agregados estables pequeños está vinculada con la disrupción que ocurrió en los macroagregados inestables grandes ($>2000 \mu\text{m}$) en el estrato Bo los cuales al disgregarse se rompen en fracciones más pequeñas (Tabla 2).

4.2 Índice de Estabilización y Desestabilización de Macroagregados Estables (SSM o DSM)

Estos índices indican que los macroagregados grandes estables en suelos bajo Bo se encuentran totalmente estabilizados en un 100% ($SSM_{n+1}=1$) y no sufrieron una desestabilización ($DSM_{n+1}=0$) por su reemplazo a pasto, al igual que los macroagregados estables pequeños que muestran una gran estabilidad ($SSM_{n+1}=1$), por ellos esta intervención no causa desestabilización en los macroagregados estables (Tabla 2).

4.3 Índice de Disrupción (DI)

El nivel de disrupción de los agregados en bosque fue del 16% (Tabla 2), este porcentaje indica que se pueden fragmentar durante una perturbación y como resultado sus unidades constituyentes pueden ser redistribuidas a fracciones de tamaño menor. Estos valores de disrupción son bajos, si comparamos otros valores de disrupción publicados por (Garcia *et al.*, 2010; Marquez *et al.*, 2019), en suelos bajo cultivo donde los índices de disrupción (DI) pueden superar hasta entre el 30 y 50% mientras que estos resultados son similares a los reportados anteriormente, en estudios de agregados en suelos bajo bosque o pasto.

4.4 Índice Total de Agregación – Disrupción (ADI)

El ADI fue negativo y su magnitud es igual a (-0.005) que significa la disrupción neta en el proceso predominante cuando el Bo fue reemplazado por Pa, en el cual existe una mínima degradación debido al impacto del uso del suelo y manejo del sistema (Tabla 2). El crecimiento de las raíces e hifas fúngicas promueve la formación de macroagregados y que la actividad de microbios permite acumular sustancias orgánicas que ligan a las partículas o agregados del suelo (Pedraza & Marquez, 2010).

Tabla 2. *Indicadores de Dinámica de Agregados del Suelo.*

	FIS_{n+1}	FIU_{n+1}	DSM_{n+1}	SSM_{n+1}				
Macroagregados grandes	0.28	0.72	0.00	1.00				
Macroagregados pequeños	0.61	0.40	0.00	1.00				
	DI	x_2	y_2	TU	A	d	α	ADI
Bosque (n) →	0.16			16.01				
Pasto ($n+1$) →	0.10	1.56	1.02	10.30	13.0	0.02	2.58	-0.005

FIS = índice de formación de macroagregados estables. FIU = índice de formación de macroagregados inestables. DSM = índice de desestabilización de macroagregados estables. ESM = índice de estabilización de macroagregados estables x_2 = cambio neto de macroagregados estables ($x_2 = S_{2,n+1} - a_2$). y_2 = cambio neto de macroagregados inestables ($y_2 = U_{2,n+1} - b_2$). TU es la cantidad total de macroagregados inestables. A = agregados que resultan de la agregación. d = agrega unidades constituyentes que resultan de la interrupción, ADI = índice de interrupción de la agregación.

Elaborado por: Los Autores

5. Dinámica de los Agregados del Suelo bajo Bosque y Pasto

5.1 Estabilización/Desestabilización

En el modelo Figura 16 se observa que el reemplazo de Bo a Pa provocó que los macroagregados estables grandes permanezcan como estables en un 100% ($a_1 = 81.9$) y se incrementen nuevos macroagregados estables $x_1 = 3.7$ y no exista una desestabilización $b_1 = 0$. Los macroagregados estables pequeños $a_2 = 1.2$ de los suelos bajo Bo permanecen como estables en el nuevo sistema de referencia y no se han visto afectados por el cambio de uso del suelo, en la fracción 2 no se produce una desestabilización de macroagregados estables pequeños $b_2 = 0$. Mientras que los microagregados y en la fracción mineral los agregados por su tamaño permanecen estables. Por la continua entrada de materia orgánica en el ecosistema pasto y el enraizamiento de su vegetación ha favorecido la formación de macroagregados estables grandes, estos resultados coinciden con lo reportado por (García *et al.*, 2010) quienes trabajando en suelos bajo selva nublada y su posterior reemplazo por pasto reportaron un comportamiento similar.

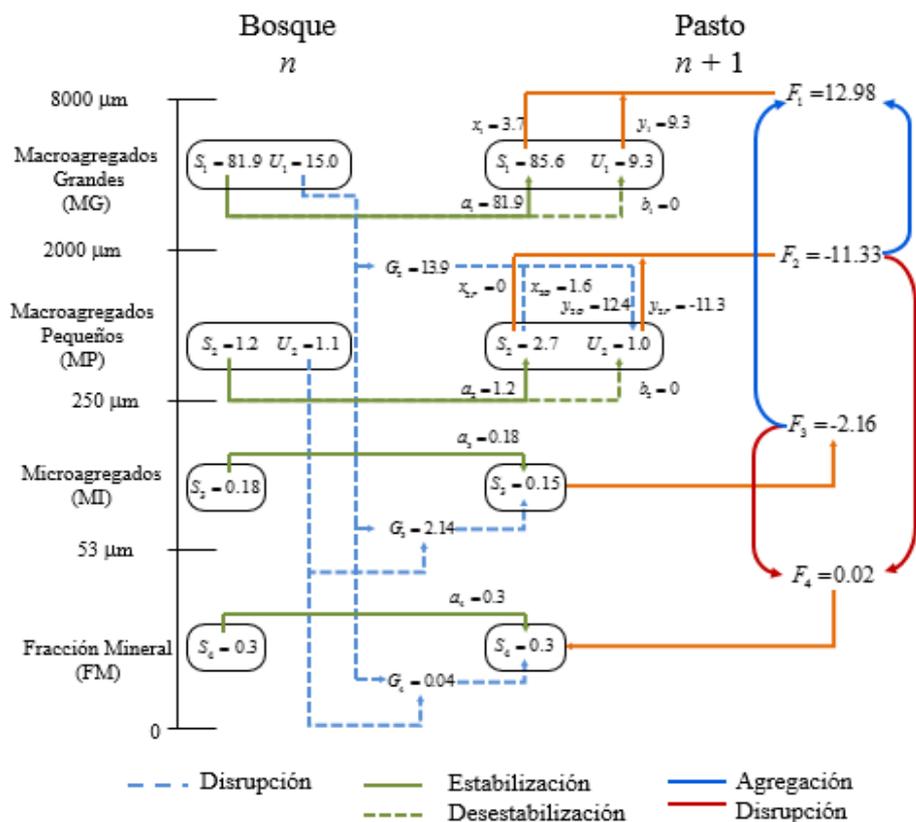


Figura 16. Dinámica de los Agregados en el Suelo (DAS)

Elaborado por: Los Autores

5.2 Disrupción

El total de disrupción de los macroagregados inestables grandes es igual a ($U_1 = 15$) y de los macroagregados inestables pequeños ($U_2 = 1.1$) en el suelo bajo Bo, lo cual es asignado en la fracción 2 del suelo bajo Pa alrededor del 86% ($G_2 = 13.9$) los cuales forman parte de los macroagregados. En la fracción 3, se adquiere una ganancia del 13% ($G_3 = 2.14$), mientras que en la fracción 4 el 0.2% ($G_4 = 0.04$) lo cual es irrelevante. Estos valores indican que los macroagregados inestables grandes ($>2000 \mu\text{m}$) en el estrato Bo al ser alterado no se desagregan en su totalidad sino que gran parte de estos pasan a formar parte de la fracción inferior macroagregados pequeños. Estos resultados coinciden con lo reportado por (García *et al.*, 2010) (Figura 16).

5.3 Agregación

El flujo neto de los macroagregados grandes es positivo ($F_1 = 12.98$) debido al cambio de uso de suelo de Bo a Pa lo que indica la entrada de macroagregados desde otras fracciones inferiores. El modelo (Figura 16) indica en la fracción 1 la formación de nuevos macroagregados inestables grandes ($y_1 = 9.3$) y de macroagregados estables ($x_1 = 3.7$) en el ecosistema Pasto. En la fracción 2 el valor es negativo ($F_2 = -11.3$) lo que indica la salida de macroagregados inestables pequeños a otras fracciones y no existe salida de macroagregados estables pequeños ($x_{2F} = 9.3$). La disrupción total de macroagregados inestables grandes resulta un total de ganancias ($G_2 = 13.9$) lo que se traduce en macroagregados pequeños estables ($x_{2G} = 1.6$) e inestables pequeños ($y_{2G} = 12.4$). En los microagregados el valor es negativo ($F_3 = -2.16$) y de igual manera se incorporan a otras fracciones y la fracción mineral ($F_4 = 0.02$) se da una mínima agregación de fracciones superiores.

6. Dinámica del Carbono Orgánico Asociado a los Agregados del Suelo bajo Bosque y Pasto

6.1 Índice de Estabilización y Desestabilización de Macroagregados Estables (SSM o DSM).

Estos índices indican que el carbono asociado a los macroagregados grandes estables en suelos bajo Bo se encuentran estabilizados en un 80% ($SSM_{n+1}=0.80$) solamente ocurrió una desestabilización del 20% ($DSM_{n+1}=0.20$) del carbono asociado a los macroagregados cuando se dio el reemplazo de Bosque a pasto, de igual forma ocurre en los macroagregados

estables pequeños que muestran una estabilidad del 74% ($SSM_{n+1}=0.74$) del carbono asociado a estos agregados y una desestabilización de C del 26% en los macroagregados estables ($DSM_{n+1}=0.26$) (Tabla 3).

6.2 Índice de Disrupción (DI)

El cambio de uso de Bosque a Pasto causa la desestabilización de los macroagregados grandes, a consecuencia de esto el carbono orgánico que está asociado a estos agregados queda expuestos a una rápida mineralización y su conversión a CO_2 .

La presencia de agregados inestables en ecosistemas no disturbados es parte del equilibrio entre la estabilización y desestabilización, es decir, la entrada de materia orgánica continua permite la estabilización de nuevos agregados y al mismo tiempo macroagregados estables son desestabilizados en sitios donde la materia orgánica se hace recalcitrante y pierde su efecto aglutinante, pero la formación de nuevos agregados estables mantiene el sistema en equilibrio. Sin embargo, en casos donde ocurre desestabilización este proceso no se da.

6.3 Índice Total de Agregación – Disrupción (ADI)

El ADI fue negativo y su magnitud es igual a (-0.08) que significa una pérdida neta de carbono orgánico producto del proceso predominante cuando el Bo fue reemplazado por Pa, esta mínima disminución de carbono (Tabla 3). Esto se explica ya que el -0.005 de macroagregados que se desagregaron liberaron el 0.08 de carbono que estaba secuestrado en estas fracciones y por la disrupción fue liberado y expuesto a la mineralización y su posterior conversión en CO_2 .

Tabla 3. *Indicadores de la Dinámica de Agregados del Suelo.*

	FIS_{n+1}		FIU_{n+1}		DSM_{n+1}		SSM_{n+1}	
Macroagregados grandes	0.00		0.00		0.20		0.80	
Macroagregados pequeños	0.00		0.00		0.26		0.74	
	DI	x_2	y_2	TU	A	d	α	ADI
Bosque (n) →	0.00			1.19				
Pasto ($n+1$) →	0.01	0.0	-23.0	2.30	0.00	0.37	-22.93	-0.08

FIS = índice de formación de macroagregados estables. FIU = índice de formación de macroagregados inestables. DSM = índice de desestabilización de macroagregados estables. ESM = índice de estabilización de macroagregados estables x_2 = cambio neto de macroagregados estables ($x_2 = S_{2,n+1} - a_2$). y_2 = cambio neto de macroagregados inestables ($y_2 = U_{2,n+1} - b_2$). TU es la cantidad total de macroagregados inestables. A = agregados que resultan de la agregación. d = agrega unidades constituyentes que resultan de la interrupción, ADI = índice de interrupción de la agregación.

Elaborado por: Los Autores

6.4 Estabilización/Desestabilización

El cambio de uso de suelo de Bo a Pa en los macroagregados estables grandes causó una estabilización del carbono orgánico del 80% ($a_1 = 73.2 \text{ mgC/kgagg}$) y obteniéndose una desestabilización del C de 20% ($b_1 = 18 \text{ mgC/kgagg}$). Para los macroagregados estables pequeños ($a_2 = 62.3 \text{ mgC/kgagg}$) representa el 74% del contenido de carbono que permaneció en el nuevo estado, mientras que el porcentaje del contenido de carbono producto de la desestabilización es del 26% ($b_2 = 21.6 \text{ mgC/kgagg}$). Así mismo, en los microagregados y fracción mineral el carbono permaneció estable el 85% ($a_3 = 58.7 \text{ mgC/kgagg}$) y 84% ($a_4 = 58.7 \text{ mgC/kgagg}$) respectivamente, mientras que una parte del porcentaje de pérdida del C se traslada a otras fracciones y otra parte se convierte en CO_2 a la atmósfera (Figura 17).

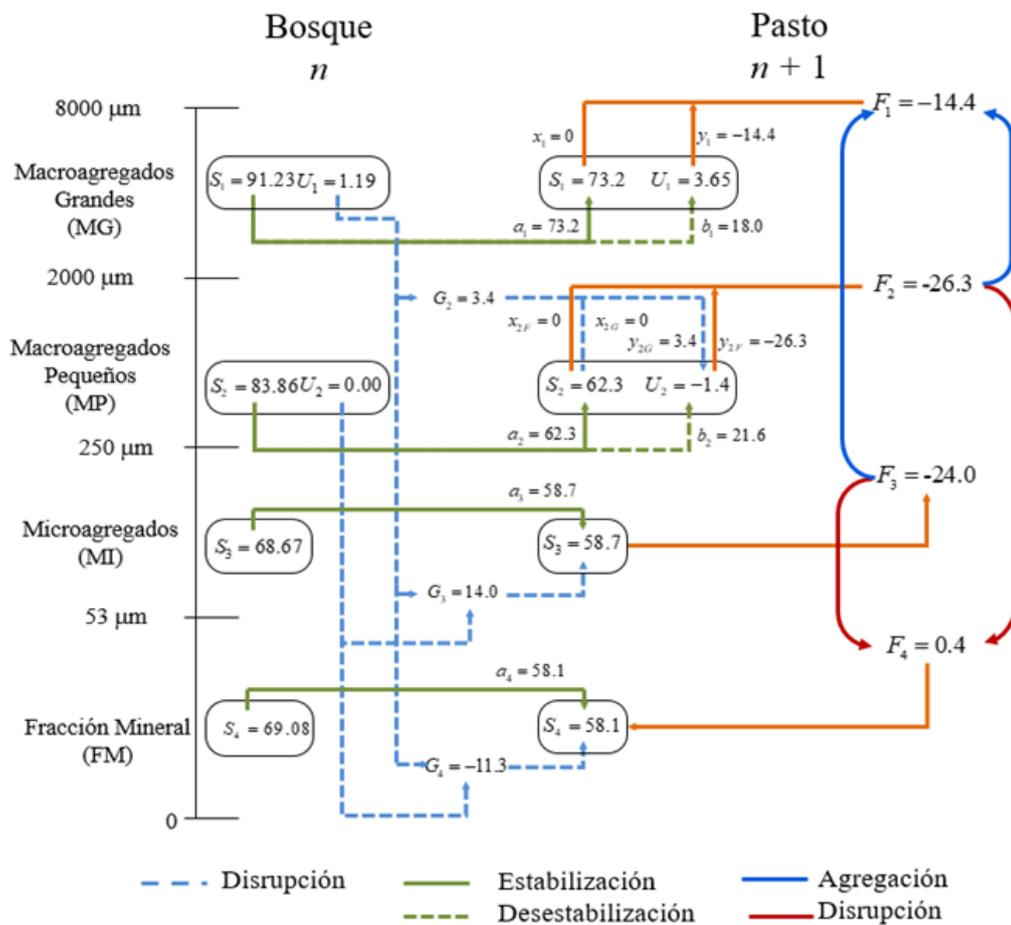


Figura 17. Dinámica del Carbono Orgánico Asociado a los Agregados del Suelo
Elaborado por: Los Autores

6.5 Agregación

El flujo neto del carbono orgánico en los macroagregados grandes es negativo ($F_1 = -14.4 \text{ mgC/kgagg}$) lo que indica que ocurre la salida de C una vez que los suelos de bosque han sido reemplazados por pasto. En la Figura 17 se identifica el C de los macroagregados pequeños y microagregados son valores negativos ($F_2 = -26.13 \text{ mgC/kgagg}$) ($F_3 = -24 \text{ mgC/kgagg}$) los cuales salen a formar parte de otras fracciones y a su vez el Carbono se convierte en CO_2 y va a la atmósfera. En contraposición el valor del carbono en la fracción mineral es ($F_4 = 0.4 \text{ mgC/kgagg}$), es decir, que existe un ingreso de carbono orgánico a esta fracción proveniente de la formación continua de agregados.

Los suelos bajo bosque tienen almacenado 314 mgC/kgagg (miligramos de Carbono por Kilogramos de agregados), pero cuando ocurre el reemplazo a pasto se pierde 59.5 mgC/kgagg . Este carbono que se encontraba localizado en los macroagregados grandes y pequeños, representa el 18,9% que se convierte en CO_2 y pasa a formar parte de la atmósfera en su reemplazo a pasto (Figura 18).

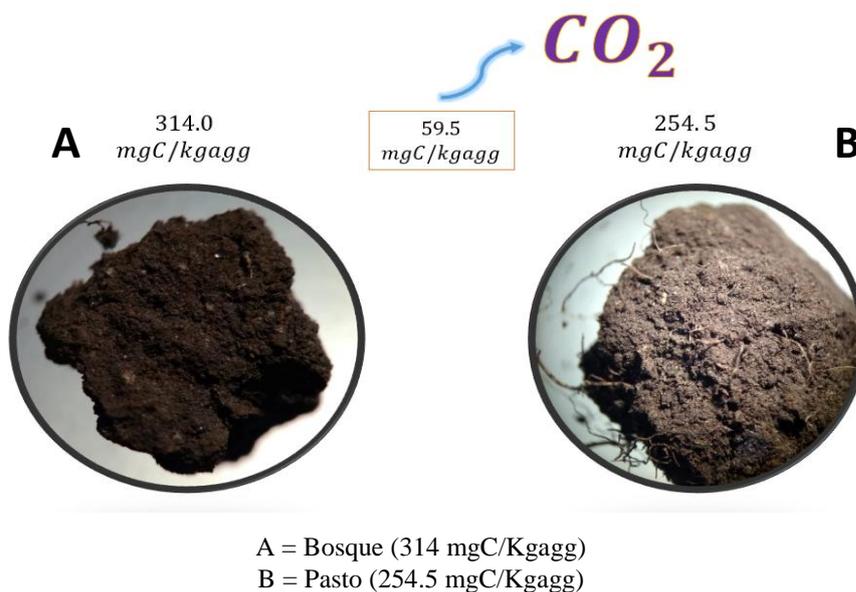


Figura 18. Carbono Asociado a los Macroagregados
Elaborado por: Los Autores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conclusiones

- Los resultados obtenidos de esta investigación, indican que existen ligeras diferencias cuando ocurre el remplazo de áreas bajo bosque por pastizales, se observa una tendencia de aumento de la densidad aparente y el pH, a la vez que los porcentajes de materia orgánica disminuyeron resultando en horizontes con colores más claros.
- Los suelos bajo Bosque presentan una mayor cantidad de macroagregados grandes estables que los suelos bajo Pasto, pero estos no fueron significativamente diferentes. A diferencia de los macroagregados inestables los cuales fueron significativamente diferentes corresponde al 15% bajo Bosque y al 9% bajo pasto.
- La dinámica de los agregados está siendo dominada por ligeros procesos de disrupción (Índice Total de Agregación Disrupción = -0,005). Así, el cambio de uso de bosque a pasto origina que se mantenga la estabilidad de los agregados debido a la contribución de las raíces y los ingresos continuos de materia orgánica.
- El cambio de uso de bosque a pasto condujo a una pérdida de carbono orgánico de 59.5 mg C/kg asociado a los macro agregados en el suelo bajo bosque. Esto se interpreta como el 18 % del carbono que estaba secuestrado en el suelo bajo bosque se convirtió en CO₂.

2. Recomendaciones

- Realizar estudios continuos en ambos estratos con el fin de obtener datos periódicos del comportamiento del carbono asociado a los agregados del suelo a través del tiempo.
- Buscar alternativas viables para evitar la disminución del carbono orgánico del suelo debido a los cambios de uso.
- Es evidente la perturbación que existe en el bosque de Ceja Andina por su reemplazo a pastizal por lo que no cuenta con un plan de manejo, por ello se requiere el apoyo de otras investigaciones y entidades con el fin de preservar esta área natural.
- Incluir los datos de esta investigación en los Planes de Ordenamiento Territorial para manejar y conservar los recursos naturales de manera sustentable debido a que esta zona es potencialmente agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A. M., & González, E. J. (2012). Generación de una línea base de los reservorios de carbono de los páramos del PNP y evaluación de su aplicación como mecanismo de mitigación al cambio climático (Bachelor's thesis).
- Association of Official Agricultural Chemists (AOAC). 2005. Official Methods of Analysis. Dumas method (990.03) . 15th edition. AOAC International. Washington DC, USA. 771 p.
- Bautista-Cruz, A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., del Castillo-Sánchez, R. F., & Etchevers-Barra, J. D. (2005). Cronosecuencia de un suelo y su clasificación en un área originalmente ocupada por bosque mesófilo de montaña. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 147-157
- Betania, M. (2016). Efecto del Cambio de Uso de Tierra sobre la Dinámica de la materia orgánica del suelo en el Chaco Seco, Argentina, (Bachelor's thesis).
- Beretta, A., Bassahum, D., & Musselli, R. (2014). ¿ Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?. *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 90-94.
- Brady, N. C., & Weil, R. (2013). *Nature and properties of soils, the: Pearson new international edition*. Pearson Higher Ed.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, 146(PA), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>
- Caranqui, J. (2011). Estudio de la diversidad florística a diferente gradiente altitudinal en el bosque montano alto Llucud, cantón chambo, provincia de Chimborazo. *Herbario Escuela Superior Politécnica Del Chimborazo*.
- Chocobar, A., Cox, R. A., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jespers, N., & Kienle, F. (2013). Contenido de Humedad del Suelo: guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo.
- Ciancaglini, N. (2010). R- 001- Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Argentina.

- Cornejo, P. I. A. (2017). Depósitos minerales no metálicos del Ecuador. *Revista Politécnica*. 10.13140/RG.2.2.24008.11523.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia Del Suelo*, revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo., 32(1).
- Flores, F. E. C., Fernández, J. A., & Gobbi, J. A. (2012). Reservorio De Carbono En Suelo Y Raíces De Un Pastizal Y Una Pradera Bajo Pastoreo Carbon Stock in Soil and Roots of a Grassland and a Sward Under Grazing. *Revista fitotecnica mexicana*, 35(1), 79–86.
- García, M., Marquez, C. O., & Lopez, E. (2010). Dinámica de agregados y su afectación por la deforestación de la selva nublada y su reemplazo por pastizal o cultivo. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Merida (Venezuela). (Vol. 54, pp. 29–43).
- García, Y., & Ramírez, W. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos : una nueva manera de evaluar este recurso Soil quality indicators : A new way to evaluate this resource 35(2), 125–138.
- Garland, G., Bünemann, E. K., Oberson, A., Frossard, E., Snapp, S., Chikowo, R., & Six, J. (2018). Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: A conceptual model. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 91-98.
- Gonzalez, A. F., & Dezzeo, N. (2011). Efecto del cambio de bosque a pastizal sobre las características de algunos suelos en los llanos occidentales de Venezuela, (January). *Interciencia*, 36(2).
- Iglesias, J., Galantini, J. ., & Vallejos, A. (2017). Estabilidad de agregados de un argiustol del so bonaerense con diferentes sistemas de labranza. *Ciencia Del Suelo*, 35(2), 189–203.
- Jiménez, A. (2014). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana, *Cenicafe*. 56(4), 381–397.
- Márquez, C. O., García, V. J., Schultz, R. C., & Isenhardt, T. M. (2017). Assessment of soil degradation through soil aggregation and particulate organic matter following conversion of riparian buffer to continuous cultivation. *European Journal of Soil Science*, 68(3), 295–304. <https://doi.org/10.1111/ejss.12422>

- Márquez, García, V., Schultz, R., & Isenhardt, T. (2019). A conceptual framework to study soil aggregate dynamics. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.12775>
- Minitab. (2016). Getting Started with Minitab 17. Minitab Inc.
- Narsilio, G. A., & Santamarina, C. (2015). Clasificación de los Suelos: Fundamento Físico, Prácticas Actuales y Recomendaciones. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA- Guillermo.
- La Manna, L. (2005). Caracterización de los suelos bajo bosque de *Austrocedrus chilensis* a través de un gradiente climático y topográfico en Chubut, Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 137-153
- Ojeda, E. (2017). Impacto del Cambio de Uso en Coberturas de Bosque a Pasto en Suelos de la Comunidad de Lluçud Provincia de Chimborazo. (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).
- Pedraza, E., & Marquez, C. O. (2010). Agregación y carbono orgánico almacenado en suelos forestales en la unidad experimental de la Reserva Forestal Caparo. Barinas, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, 25(1), 11-24.
- Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto. FAO. (Octava Ed). Roma (Italia).
- Robertson, F., Crawford, D., Debra, P., Oliver, I., Rees, D., Aumann, C., ... Baldock, J. (2016). Soil Organic Carbon in cropping and pasture systems of Victoria, Australia. *Soil Research*, 54(1), 64-77.
- Schweizer, S. A., Fischer, H., Häring, V., & Stahr, K. (2017). Soil structure breakdown following land use change from forest to maize in Northwest Vietnam. *Soil and Tillage Research*, 166, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.010>
- Suárez, G., Campos, A., & Cruz, L. (2015). Dinámica del Carbono y Nitrógeno del suelo en ecosistemas de la costa tropical seca, en la mancha (Cicolma), Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(3).
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., ... & Ray, N. (2018). Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 104-136.

- Torres-Sallan, G., Creamer, R. E., Lanigan, G. J., Reidy, B., & Byrne, K. A. (2018). Effects of soil type and depth on carbon distribution within soil macroaggregates from temperate grassland systems. *Geoderma*, 313(October 2017), 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.012>
- Vargas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos. (No. FAO 631.44 G943 2009). FAO, Roma (Italia).
- Villasanti, C. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Ed.). Paraguay.

ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas de los Puntos de Muestreo.

<i>Estrato</i>	<i>Conglomerado</i>	<i>Parcela</i>	<i>COOR (X)</i>	<i>COOR (Y)</i>	<i>Altitud (m.s.n.m)</i>
<i>BOSQUE</i>	CB1	P1	770752	9809168	3051
		P2	770502	9809168	3040
		P3	770502	9809418	3099
	CB2	P1	771692	9807759	3227
		P2	771442	9807759	3219
		P3	771442	9808009	3240
	CB3	P1	771149	9808669	3120
		P2	770899	9808669	3145
		P3	770899	9808919	3068
<i>PASTO</i>	CP1	P1	773753	9808268	3611
		P2	773503	9808268	3600
		P3	773503	9808518	3545
	CP2	P1	773133	9808528	3450
		P2	772883	9808528	3409
		P3	772883	9808778	3496
	CP3	P1	772546	9808969	3520
		P2	772296	9808969	3456
		P3	772296	9809219	3414

C: Conglomerado; B: Bosque; P: Pasto
 CB1: Conglomerado uno de Bosque; CP1: Conglomerado uno de Pasto; P1: Parcela uno

Anexo 2. Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos.

Estrato	Conglomerado	Parcela	pH H2O	Humedad (%)	Densidad (g/cm3)	Superficie	Color		Textura del suelo
						Específica (m2/g)	Seco	Húmedo	
Bosque	1	P1	6,44	60,16	0,91	73,40	7,5 YR 2,5/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P2	5,81	60,08	1,14	73,40	10 YR 2/1	7,5 YR 2,5/1	Franco Arcilloso
		P3	5,92	61,10	1,07	97,86	10 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
	2	P1	5,46	62,60	1,00	73,40	7,5 YR 2,5/1	10 YR 2/1	Arcilloso
		P2	5,86	63,06	0,75	73,40	10 YR 3/2	7,5 YR 2,5/1	Franco Limoso
		P3	5,86	61,38	0,81	97,86	10 YR 2/2	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
	3	P1	5,46	61,27	0,95	97,86	7,5 YR 4/2	10 YR 2/1	Franco Arcilloso Limoso
		P2	5,43	60,68	0,97	97,86	10 YR 3/2	10 YR 2/1	Franco Arcilloso Limoso
		P3	5,59	63,17	0,95	97,86	7,5 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
Pasto	1	P1	6,15	50,31	1,14	146,80	7,5 YR 2,5/1	10 YR 2/1	Arcilloso
		P2	6,36	49,08	1,18	146,80	10 YR 2/2	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P3	6,76	49,42	1,07	171,26	7,5 YR 2,5/1	10 YR 2/1	Arcilloso
	2	P1	6,03	45,30	0,94	97,86	7,5 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P2	6,17	48,80	0,93	97,86	7,5 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P3	6,03	47,42	1,18	97,86	10 YR 2/2	10 YR 2/1	Arcilloso
	3	P1	6,19	49,73	1,16	97,86	7,5 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P2	6,17	50,44	1,14	97,86	7,5 YR 2,1/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso
		P3	6,05	49,00	1,06	97,86	7,5 YR 3/1	10 YR 2/1	Franco Arcilloso

Anexo 3. Fotografías

3.1 Salida de Campo



Fotografía 1. Medición de la parcela de muestreo.



Fotografía 2. Toma de muestras en el estrato Bosque.



Fotografía 3. Toma de muestras, estrato Pasto.



Fotografía 4. Recolección de muestra de suelo para cálculo de densidad aparente.



Fotografía 5. Homogenización y recolección de la muestra compuesta.



Fotografía 6. Toma y recolección de muestras de suelo bajo Pasto.

3.2 Análisis en Laboratorio



Fotografía 7. Preparación de muestras.



Fotografía 8. Tamizado de muestras.



Fotografía 9. Medición de pH.



Fotografía 10. Cálculo de Densidad Aparente.



Fotografía 11. Análisis de color mediante la Tabla de Colores de Munsell.



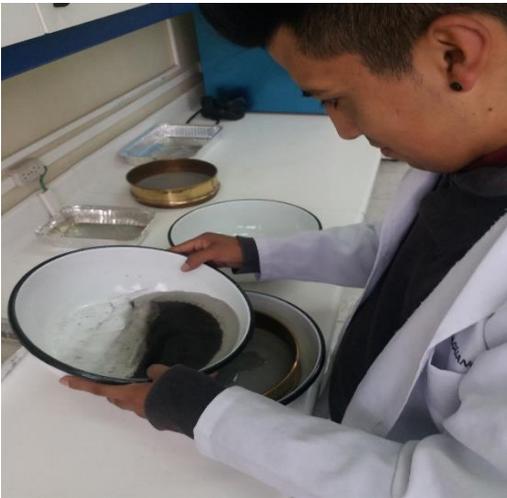
Fotografía 12. Cálculo de Superficie Específica.



Fotografía 13. Determinación de clase textural de las muestras recolectadas.



Fotografía 14. Reposo de la muestra previo al fraccionamiento.



Fotografía 15. Realización de los fraccionamientos.



Fotografía 16. Recolección de las muestras pasadas por los diferentes tamices.



Fotografía 17. Proceso de pesado de las muestras para la determinación de carbono orgánico.



Fotografía 18. Análisis de carbono en el equipo Flash 2000.