



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Colombia

**Pontificia Universidad Javeriana**

**Modelamiento del almacenamiento y distribución del carbono orgánico del suelo a partir de las características físicas del paisaje y diferentes tipos de coberturas del páramo de Guacanas y las Delicias, en los municipios de Inzá, Silvia y Totoró, del departamento de Cauca.**

**Tesis**

Para optar por el Grado de:

**ECÓLOGO**

**Presenta**

**Juan Sebastián Montero Bernal**

**Facultad de Estudios Ambientales y Rurales**

**Tabla de Contenido**

<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
1.1	Problema de Investigación	3
1.2	Justificación	6
<b>2.</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
2.1	General	6
2.2	Específicos	6
<b>2.</b>	<b>Marco referencial</b>	<b>7</b>
3.1	Marco teórico	7
3.1.1	El ecosistema páramo	7
3.1.2	El ciclo del carbono	9
3.1.3	Los Suelos de páramo y el carbono	10
3.1.3	Clasificación de cobertura vegetal con el uso de imágenes de sensores remotos	14
3.2	Antecedentes	14
<b>4.</b>	<b>Área de estudio (Incluye mapa ubicación)</b>	<b>16</b>
<b>5.</b>	<b>Materiales y métodos</b>	<b>17</b>
5.2	Diseño del estudio	19
5.2.1	Diseño de muestreo	19
5.3	Análisis del suelo	19
5.4	Datos espaciales	20
5.5	Datos de carbono orgánico del suelo	21
5.6	Análisis estadístico y espacial	21
5.6.1	Análisis Estadístico	22
5.6.2	Análisis Espacial	22
5.7	Software	23
<b>6.</b>	<b>Resultados</b>	<b>23</b>

<b>7. Discusión</b> .....	31
<b>8. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	34
<b>9. Referencias Citadas</b> .....	35

## **Resumen**

El páramo es un ecosistema ubicado en las zonas alpinas en el norte de los andes con distinguidas condiciones físico-bióticas como lo es las bajas temperaturas, la alta nubosidad y una gran diversidad de especies nativas. Este ecosistema brinda importantes servicios ecosistémicos como el almacenamiento y regulación de agua, como también ser reservorio de carbono. Como reservorio de carbono orgánico del suelo, el páramo se ha vinculado en diferentes estudios de almacenamiento de carbono, en busca de estrategias para combatir el cambio climático y negociar con datos empíricos, en el cuidado y la preservación del páramo. En la actualidad, se utilizan diferentes metodologías con el fin de estimar el contenido neto del carbono en el suelo del páramo con el fin de implementar metodologías precisas y de bajo costo. Dicho esto, en esta investigación se utilizó un algoritmo matemático para modelar la distribución y almacenamiento del contenido de carbono en los suelos del páramo Guancanas y las Delicias, a partir de los diferentes tipos de coberturas, según el hábito de crecimiento e imágenes de Radar, donde se encontró una variedad de factores físicos que podrían ser determinantes, y que, bajo ciertas condiciones el modelo implementado, podría tener mayor precisión, como también identificar qué factores son convenientes en este tipo de estudios.

### **1. Introducción**

#### **1.1 Problema de Investigación**

Las zonas de alta montaña en el norte de los Andes, conocidas como páramo (Luteyn, 1999), son ecosistemas ubicados entre los 3000 y 4700 msnm, con una cobertura mayor a las 7.500.000 hectáreas , extendiéndose desde Costa Rica hasta el norte de los Andes de Colombia, Venezuela, Ecuador y Perú (Buytaert et al., 2006; R Hofstede et al., 2014; García et al., 2019). Gracias a su ubicación y distinguidas condiciones físico-bióticas como lo es las bajas temperaturas, la alta nubosidad y una gran diversidad de especies nativas, el páramo es el mayor proveedor de agua en la región Andina (R. Hofstede et al., 2001; Buytaert et al., 2006). Siendo los páramos colombianos importantes para la comunidad local por su valor agrícola e hídrico (Ortiz et al., 2005). Sin embargo, la actividad antrópica en las últimas décadas, han afectado los ecosistemas andinos, por medio de cultivos y pastizales, en donde se ha promovido una disminución de la cobertura natural y/o protección física del suelo, afectando el ciclo del carbono orgánico, teniendo repercusiones

negativas en este ecosistema (Post & Kwon, 2000; Castañeda et al., 2017). Este carbono, mejor conocido como carbono orgánico del suelo (COS), es uno de principales componentes del suelo que funciona como un indicador de la salud del suelo, gracias a que el COS contribuye a la producción de alimentos, la mitigación y adaptación al cambio climático, y el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Lefèvre et al., 2017). Por otra parte, gracias a las características distintivas del suelo del páramo, este ecosistema es considerado una fuente de agua disponible para su posterior consumo humano debido a la alta capacidad de retención y almacenamiento de agua en los páramos, gracias a la baja descomposición de materia orgánica, a causa de las bajas temperaturas y la alta humedad (Buytaert et al., 2006).

En el páramo, el ingreso del carbono por medio de la materia orgánica ha promovido que se encuentre en los suelos la mayor parte de las reservas de carbono orgánico (Avagyan et al., 2015). El carbono orgánico promueve la capacidad de filtración de agua de los suelos permite el suministro de agua limpia (Lefèvre et al., 2017, p. 8). Los páramos hacen parte de un sistema de cuatro reservorios en: vegetación aérea y radicular, materia en descomposición, suelos y productos forestales, con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes y estrechamente interrelacionados (De Petre et al., 2005; Cargua et al., 2014), donde el contenido de carbono varía dependiendo del tipo de cobertura, según el hábito de crecimiento y el género de las especies encontradas (Mileth, 2009; Ayala et al., 2014). Esta variación en el contenido de carbono es gracias a las diferentes concentraciones de carbono en la biomasa, la cual depende de la composición de especies leñosas o carnosas, donde parte de la biomasa presente en las diferentes coberturas funcionan como reservas o entradas de carbono al suelo en forma de materia orgánica (Hofstede, 1997; Ayala et al., 2014). Sin embargo, se ha encontrado, que debido a la transformación de coberturas naturales a coberturas agrícolas se ha venido afectando el páramo, por medio de la eliminación de vegetación nativa que reduce el ingreso de la materia orgánica en el suelo y a su vez, se incrementa la tasa de descomposición de residuos vegetales (Post & Kwon, 2000; G. Dercon et al., 2007; Castañeda et al., 2017). Al reducir la materia orgánica, se reduce la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos, dando como resultado, a una exposición de materia orgánica, acelerando su descomposición (Poulenard et al., 2001; R. Hofstede et al., 2001). Al disminuir el contenido de materia orgánica en el suelo, estos pasan transforman de retenedores a repelentes de agua (hidrofóbicos) (Poulenard et al., 2001; R. Hofstede et al., 2001). Asimismo, se libera parte de los nutrientes inmovilizados de forma rápida en un pequeño intervalo de tiempo Lo que abre una pequeña ventana para ser aprovechados y los nutrientes restantes se desperdician (lixiviación)(R. Hofstede et al., 2001). Adicionalmente, se ha encontrado en áreas de cultivos cambios en la estructura geológica de los campos con el tiempo, producto de la labranza y agua (Aase & Pikul, 1995; Lewis & Nyamulinda, 1996; Gerd Dercon et al., 2003). Las cuales disminuye el riesgo de erosión hídrica, pero al mismo tiempo puede conducir a la exposición del subsuelo en el borde de la pendiente ascendente del campo, con efectos potencialmente perjudiciales sobre la fertilidad del suelo (Aase & Pikul, 1995; Lewis & Nyamulinda, 1996; Gerd Dercon et al., 2003; G. Dercon et al., 2007).

En la actualidad, se está debatiendo sobre nuevas tecnologías para avanzar en la estimación de carbono con una alta resolución, con el fin de mejorar el conocimiento y la magnitud de los cambios netos en las diferentes reservas de carbono, como lo es el almacenamiento en el suelo, dando como resultados una serie de avances en el monitoreo satelital. Si bien estas nuevas metodologías no eliminan el trabajo “*in situ*” de investigación, es una herramienta útil en el análisis de los ecosistemas (Goetz & Dubayah, 2011). Gracias a el Sistema de Información Geográfica, mejor conocido como GIS, por sus siglas en ingles se desarrolla un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes, con el objetivo de organizar y manejar la información geográfica(V. Radha Krishna Murthy, 2004). Lo que permite en la actualidad, que estos sistemas sean utilizados para computarizar la información geográfica existente, procesando y retroalimentando sistemas con un hardware y software diseñado especialmente para realizar modelos espaciales con la respectiva información geográfica(V. Radha Krishna Murthy, 2004). Dando como resultado, el uso integral entre la información recolectada de forma remota y el desarrollo científico en campo, por medio de herramientas para cuantificar la contribución de los ecosistemas y la agricultura al presupuesto del carbono (Maracchi, 1991). Actualmente, se ha recomendado árboles de regresión (CART) en estimaciones espaciales de COS, utilizado comúnmente a partir del tipo de uso de cobertura, textura del suelo y porosidad del suelo para estimar el COS (Kern et al., 1994; Batjes, 2000; Liebens & VanMolle, 2004; Lettens et al., 2005; Meersmans et al., 2009).

Parte de los monitoreos vía satélite son utilizados en la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) para desarrollar un marco de referencia en las emisiones de carbono por el cambio de cobertura, principalmente, la deforestación, para poder reconocer los efectos adversos de estas actividades sobre los ecosistemas (Meersmans et al., 2009; Houghton, 2010).Sin embargo, en la actualidad es un reto hacer estudios precisos a partir de imágenes satelitales en estos ecosistemas de alta montaña debido , a las nubes densas y la compleja topografía que hace un reto identificar algunos tipos coberturas (Weiss & Walsh, 2009; Otto et al., 2011; Hribljan et al., 2016; Rodney A Chimner et al., 2019). Además de su capacidad de almacenamiento y captación de carbono atmosférico, a través de la retención de materia orgánica en sus suelos y la absorción de dicho elemento por los diferentes tipos de coberturas en crecimiento, el páramo es un ecosistema estratégico de amplia importancia nacional e internacional para combatir la deforestación y el cambio climático (Robert Hofstede et al., 2003; Buytaert et al., 2011; Cargua et al., 2014; Fernández Pérez et al., 2019)

El propósito de esta investigación es analizar la interacción entre los diferentes tipos de coberturas de páramo u atributos físicos del paisaje con el carbono orgánico del suelo. Así mismo, se busca evaluar y comparar los cambios en la distribución del carbono orgánico del suelo en las diferentes coberturas, para determinar una posible relación entre dos o más factores, bien sea físicos o tipos de coberturas, que inciden en la distribución del carbono orgánico del suelo, con el objetivo de encontrar métodos de bajo costo y una mayor precisión en la estimación de COS. Finalmente, evaluar la precisión del modelo al comparar los datos obtenidos en campo y contrastarlos con los

datos modelados a partir del algoritmo matemático, con el fin de analizar y evaluar posibles aspectos a mejorar.

## **1.2 Justificación**

La captura del carbono orgánico del suelo ha sido estudiada en diversos escenarios, con el fin de evaluar el potencial de almacenamiento que poseen los diferentes ecosistemas, a través de diferentes mecanismos de medición (Stockmann et al., 2013; Fernández Pérez et al., 2019). Sin embargo, los costos y la dificultad de acceso, entre otras limitantes, son un reto en la actualidad para desarrollar una metodología eficaz y rentable en las estimaciones de CO<sub>2</sub>. De tal forma, es necesario buscar un modelo que permita determinar de forma precisa el COS a gran escala con el menor costo de inversión y tiempo. La presente investigación busca desarrollar una metodología en poca inversión de tiempo y dinero, donde se haga una estimación de COS de forma precisa. Para ello se va a realizar un análisis de la cantidad de COS almacenado en el suelo, y a partir de estos datos, mediante la identificación de tipos de coberturas según el hábito de crecimiento y el uso de imágenes de radar se busca determinar el almacenamiento y distribución de CO<sub>2</sub> con el fin de disponer de datos empíricos en las negociaciones, para reducir las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a deforestación y degradación forestal (REED) (Goetz & Dubayah, 2011; Castañeda et al., 2017).

## **2. Objetivos**

### **2.1 General**

Modelar la distribución y almacenamiento del carbono orgánico del suelo, a partir de las diferentes características físicas del paisaje y los diferentes tipos de coberturas presentes en el páramo Guanacas y las Delicias en los municipios de Totoró, Inzá y Silvia, del departamento de Cauca.

### **2.2 Específicos**

2.2.1 Identificar los tipos de coberturas según la composición taxonómica y el hábito de crecimiento de la vegetación presente en el páramo Guanacas y las Delicias.

2.2.2 Generar un modelo espacial con relación a los diferentes tipos de coberturas, a partir de las características físicas del páramo.

2.2.3 Describir y analizar las fortalezas y debilidades del modelo espacial del carbono orgánico del suelo dentro del páramo Guanacas y las Delicias.

## **Pregunta General**

Cuál es el efecto de las características físicas y de paisaje, y de las coberturas vegetales sobre el carbono orgánico del suelo en el páramo...

## **Preguntas Específicas**

¿Cuál es la relación entre el Carbono orgánico del suelo y los diferentes tipos de coberturas?

¿Cuáles son las características físicas del paisaje que podrían determinar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo?

¿Cuáles son los principales factores que podrían determinar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo?

## **2. Marco referencial**

### **3.1 Marco teórico**

#### **3.1.1 El ecosistema páramo**

Los páramos son ecosistemas zonales ubicados en las montañas tropicales de centro y sur América, por encima del límite superior de bosque cerrado, o bosque de niebla, y por debajo del límite superior de vida (R. Hofstede, 1997; Luteyn, 1999). Los páramos están Ubicados entre los 3000 y 4700 m.s.n.m., extendiéndose desde Costa Rica hasta Colombia, Venezuela, Ecuador y Perú. Estos ecosistemas, tienen un área aproximada entre las 3.500.000 hectáreas hasta las 7.500.000 hectáreas. Esta discrepancia se debe a incertidumbres relacionadas con el límite inferior del páramo, el cual estaría situado sobre los 3.800 m de altitud (Dinerstein et al., 1995; Robert Hofstede et al., 2003; Buytaert et al., 2006; R Hofstede et al., 2014). los páramos colombianos están ubicados entre las latitudes 12°N y 4 °S, poseen un área de 1.400.000 ha, equivalente al 1.3% del territorio nacional(Ortiz et al., 2005). Por otra parte, estos páramos, hacen parte de diversos factores que los definen como un ecosistema único debido a sus características físico-bióticas distintivas. Esto se debe a las funciones primordiales que brinda a la sociedad, mejor conocido como servicios ecosistémicos(R. Hofstede et al., 2001), tales como: la regulación del sistema hídrico en el país, proveer de agua potable, para riego y generación de energía, por medio de hidroeléctricas en la región Andina(R. Hofstede et al., 2001). Además de su importancia ecológica, que es generada por la biodiversidad que alberga y su importancia agrícola (R. Hofstede et al., 2001).

Para poder entender el aporte de este ecosistema hacia un contexto local y global, es necesario partir del recurso que más se explota, que es el agua. Los páramos pueden almacenar entre 506-933 mm de agua por año, equivalente a 2/3 de la lluvia anual en la región Andina (Buytaert et al., 2006). Esto se debe a las bajas temperaturas y una alta humedad relativa. Si bien la gran humedad no se evidencia tanto por las altas precipitaciones, existen regiones donde la cantidad de lluvia por año alcanza más de 3.000 mm, que por lo general los páramos tienen una precipitación media anual de 1.000 mm o menos (R. Hofstede et al., 2001). Por otra parte, gracias al frío y la alta nubosidad a esta altura, la evaporación es muy baja, lo que traduce en un alto rendimiento de agua (precipitación - evaporación). Aparte de la precipitación vertical (lluvia), el agua llega al ecosistema por precipitación horizontal, por medio de la intercepción de la niebla, así como el rocío que se origina a partir de las grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche (Luteyn, 1999; Rangel-Ch, 2000; R. Hofstede et al., 2001). Debido a dichas condiciones del páramo, este ecosistema también favorece la acumulación de materia orgánica en el suelo. Esto se debe a una asociación entre materia orgánica y partículas minerales presentes en el suelo, las cuales tienden a ser estables y resistentes a la descomposición microbiana (Wagai et al., 2015). Por esto, en situaciones con poca intervención humana, el suelo del páramo se encuentra siempre húmedo, es decir, con grandes reservas de materia orgánica. Cabe resaltar que existe una relación directa entre agua y materia orgánica, lo que traduce que a mayor agua hay acumulada, hay más materia orgánica (R. Hofstede, 1997).

El páramo es un ecosistema que alberga una gran diversidad de especies nativas, que se debe a la diversos sucesos aislados y orografía fragmentada en el altiplano andino, donde se promueve una alta especialización y gran endemismo (Castañeda et al., 2017). Este ecosistema, alberga cerca de 5.000 especies diferentes de plantas, cerca del 60% son endémicas, adaptadas a las marcadas condiciones climáticas y físico-químicas del suelo, tales como: baja presión atmosférica, intensa radiación ultravioleta y efectos de secamiento del viento (R. Hofstede & Robert, 1995; Castañeda et al., 2017). Sin embargo, gracias al cambio climático y la marcada intervención humana a través de los cambios en el tipo y uso de cobertura, a través de la agricultura, pastoreo y plantaciones de uso. Se ha venido afectando la diversidad, lo que ha conllevado a mover el ecosistema a un estado latente de amenazas, a través de la degradación del suelo (García et al., 2019). Al mismo tiempo, por el efecto del cambio climático, se incrementa las temperaturas, y a su vez, cambia los patrones de lluvia, lo que da como resultado un efecto de forma directa e indirecta en la evolución de suelos (pedogénesis), es decir, una mal formación en los suelos relativamente nuevos (Tian et al., 2016). Como consecuencia, se altera la capacidad de almacenamiento de carbono y liberación de carbono de la materia orgánica del suelo humificado (Tian et al., 2016; García et al., 2019)

Aunque el suelo de páramo es bastante estable frente a los disturbios, es importante destacar que, para cumplir de forma adecuada en la retención de materia orgánica, de agua y nutrientes, se puede llegar a degradar con gran facilidad cuando se seca. (hidrofóbicos) (Poulenard et al., 2001; R. Hofstede et al., 2001). Asimismo, se libera parte de los nutrientes inmovilizados de forma rápida



en un pequeño intervalo de tiempo, lo que abre una pequeña ventana para ser aprovechados y los nutrientes restantes se desperdician (lixiviación)(R. Hofstede et al., 2001). Finalmente, la presencia de una cobertura vegetal constantemente húmeda es importante para mantener una retención de agua en condiciones adversas, como las épocas secas(R. Hofstede et al., 2001). Si se quita esta cobertura, el suelo es susceptible a secarse por la exposición directa a factores físicos y climáticos (R. Hofstede & Robert, 1995; Mena et al., 2000; R. Hofstede et al., 2001).

### **3.1.2. El ciclo del carbono**

En la biosfera, existen diferentes reservas de carbono, principalmente presentes como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) Estos gases tienen un rol crucial y distintivo, en el desarrollo de diferentes formas de vida, alternando diversos procesos que ocurren en la superficie del planeta. El dióxido de carbono es el principal precursor en la fotosíntesis, metabolismo y descomposición de materia orgánica. A través de la transformación en meteorización, provee una porción significativa de las rocas sedimentarias de la tierra contribuyendo al ciclo del carbono en la litosfera (Sundquist & Visser, 2003). El rol del páramo en el almacenamiento de carbono es menos conocido, aparte de captar dióxido de carbono de la atmósfera, los suelos cumplen un rol en el almacenamiento de carbono, siendo los páramos ecosistemas estratégicos de gran importancia nacional e internacional(R. Hofstede et al., 2001; Buytaert et al., 2011; Cargua et al., 2014; Fernández Pérez et al., 2019). De hecho, al disponer de una síntesis del carbono almacenado en el páramo, este podría contribuir en la política internacional de cambio climático, mediante el almacenamiento y regulación del carbono. Con el objetivo de lograr fundamentar la adopción de un mejor manejo de recursos naturales y apoyar de forma económica estos ecosistemas (Ward et al., 2016; Castañeda et al., 2017).Las cuatro mayores reservas de carbono son: la atmósfera, los océanos, combustibles fósiles y ecosistemas terrestres, en este caso los páramos, que incluye vegetación y suelos. Anualmente, la cantidad de carbono intercambiado por vulcanismo, erosión y formación de rocas sedimentarias, han sido pequeños durante millones de años y generalmente ignorados en las existencias de carbono cuantificado (Sundquist & Visser, 2003).

En la atmósfera: el promedio global de concentración de CO<sub>2</sub> estuvo cercano a 380 ppmv (partes por millón de volumen) en el 2005, equivalente a aproximadamente 805 PgC (1Pg= 1 petagramo = 10<sup>15</sup>g = 109 toneladas métricas). Los hidrocarburos no metálicos y el monóxido de carbono (~0,1 ppm), son gases que contienen carbono pero que desde un punto de vista del equilibrio del carbono global, pueden llegar a ser ignorados(Houghton, 2007; Castañeda et al., 2017). En ecosistemas de alta montaña, dentro de los cuales se encuentran los páramos, los grandes reservorios de carbono orgánico en el suelo (COS) están directamente relacionados con el CO<sub>2</sub> en el ciclo de carbono y son resultado de la alta productividad primaria neta, así como de las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica debido a las bajas temperaturas (Zimmermann et al., 2010; Fernández Pérez et al., 2019).

En los ecosistemas terrestres: en este caso la vegetación y el suelo, el carbono integra cerca de 0.27% de la masa de los elementos de la corteza terrestre (Bolin et al., 1979). La vegetación contiene almacenado carbono en el orden de  $550 \pm 100$  Pg. Ahora bien, la materia orgánica en los suelos es 2 a 3 veces esta cantidad, es decir, 1500-2000 PgC en el primer metro del suelo y 2300 PgC en los primeros 3 metros (Jobbágy & Jackson, 2000). Los bosques se destacan como reservorios de carbono, gracias a una mayor capacidad de almacenamiento en unidad de área que otros tipos de vegetación (Houghton, 2007; Castañeda et al., 2017).

Actualmente, el flujo neto de carbono en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a partir de cambios en las coberturas cumple un rol importante en el ciclo del carbono global, por diferentes factores. Primero, gracias a los cambios de tipo y uso de cobertura, se ha venido incrementando de manera acelerada la liberación neta de carbono a la atmósfera. A lo largo de los últimos siglos (Quéré et al., 2009). No obstante, las estimaciones varían y la liberación neta anual aún es muy incierta, a comparación de otros términos investigados en el ciclo global del carbono (Quéré et al., 2009; Houghton, 2010). Sin embargo, según Houghton (2010), la liberación neta de carbono a partir del cambio de uso de cobertura, con relación a otros reservorios de carbono, ayudan a definir de forma más precisa las dinámicas y efectos sobre el ciclo global de carbono. Si bien sería conveniente tener un solo término para tener una mayor precisión en el balance global del carbono, todavía no existe métodos disponibles para la medición directa del flujo terrestre neto o el flujo terrestre residual (Houghton, 2010).

Debido a la capacidad de alta retención de materia orgánica de los páramos en los suelos, estos pueden llegar a almacenar hasta 143 toneladas C/ha (Farley et al., 2013; García et al., 2019). En la actualidad, parte de estos estudios en la estimación de carbono almacenado, se hace a partir del tipo de coberturas, que puedan ser documentados con información secundaria recolectada a partir de sensores remotos, y de igual manera, analizar los cambios asociados a las reservas de carbono (Houghton, 2010). Ya que según Houghton (2010), son conocidos por ser muy bien estudiados para hacer posible el cálculo de una porción del flujo terrestre de carbono en los diferentes usos y cambios de estas coberturas. Cabe resaltar, que existen diferentes categorías para el tipo de cobertura, que varía según el autor y la diversidad representada (Houghton, 2010)

Tener estos factores y los posibles efectos que se pueden generar en el cambio global de carbono entre la superficie (particularmente bosques) y la atmósfera, junto con observaciones de imágenes satélites, son necesarios no únicamente para tener una mejor aproximación de tipos de vegetación, sino que también brinda información importante sobre las reservas de carbono, principalmente en la biomasa (Goetz & Dubayah, 2011). Dando a entender, la importancia y el rol que cumple las coberturas vegetales del páramo, como una herramienta para la comprensión del ciclo global del carbono (Goetz & Dubayah, 2011).

### **3.1.3. Los Suelos de páramo y el carbono**

Uno de los principales componentes del suelo directamente relacionado con el carbono es la materia orgánica, principalmente formada a partir de diferentes residuos vegetales y exudados que a lo largo del tiempo se van incorporando al suelo, por medio de la edafofauna (Lützow et al., 2006). Dicho esto, la materia orgánica del suelo (MOS) es la principal fuente de carbono en el suelo a través de la transformación de materia orgánica, dando como resultado, una mezcla biogeoquímica compleja de residuos vegetales y productos en varias etapas de descomposición microbiana (Lützow et al., 2006; Paul, 2014; Lefèvre et al., 2017, p. 1). Principalmente, la materia orgánica contiene entre 55 a 60 por ciento de carbono. En muchos de los suelos, este carbono comprende la mayor parte o totalidad de las reservas de carbono, refiriéndose a carbono orgánico del suelo (COS), el cual omite sus formas inorgánicas del carbono en el suelo (Avagyan et al., 2015). Por lo general, El COS es un indicador de la salud del suelo, importante por sus contribuciones a la producción de alimentos, la mitigación y adaptación al cambio climático, y el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Lefèvre et al., 2017, p. 5). Podemos incluir, que un alto contenido en MOS proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo y, en definitiva, mejora la productividad de los alimentos (Lefèvre et al., 2017, p. 5). Además, el COS mejora la estabilidad estructural del suelo promoviendo la formación de agregados que, junto con la porosidad, aseguran suficiente aireación e infiltración de agua para promover el crecimiento de la planta. Con una cantidad óptima de COS, la capacidad de filtración de agua de los suelos permite el suministro de agua limpia. A través de la mineralización acelerada, los suelos pueden ser una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Lefèvre et al., 2017, p. 8). El COS se divide en diferentes grupos en función de su estabilidad física y química (Avagyan et al., 2015; O'Rourke et al., 2015) los cuales son: COS de reserva rápida (reserva activa); con una duración estacional en el suelo de 1 – 2 años , COS de reserva intermedia, con una duración estacional en el suelo de 10-100 años y COS de reserva lenta, altamente estabilizado con una duración estacional en el suelo de 100 a >1000 años (Lefèvre et al., 2017, p. 4).

La abundancia de carbono orgánico en el suelo afecta y es afectado por la producción de las plantas, como lo es en la fotosíntesis, cumpliendo un rol clave en el control de la fertilidad del suelo y en la producción agrícola (McGraw-Hill et al., n.d.; Dokuchaev, 1883; Hilgard, 1911; Tiessen et al., 1994). Las dinámicas del carbono orgánico del suelo (COS) y su distribución, es crucial para entender nuestra biosfera, esto se debe a la gran importancia que tiene el COS y su rol en los ecosistemas, siendo una vía para entender los diferentes fenómenos que ocurre en la atmósfera y en el calentamiento global (Raich et al., 1991; Trumbore et al., 1996; Woodwell et al., 1998). Nuestra capacidad de predecir los efectos adversos del cambio climático y el cambio en el tipo de coberturas, depende en parte, de la clara descripción de la distribución del COS y los factores que inciden en sus entradas y salidas del sistema (Jobbágy & Jackson, 2000).

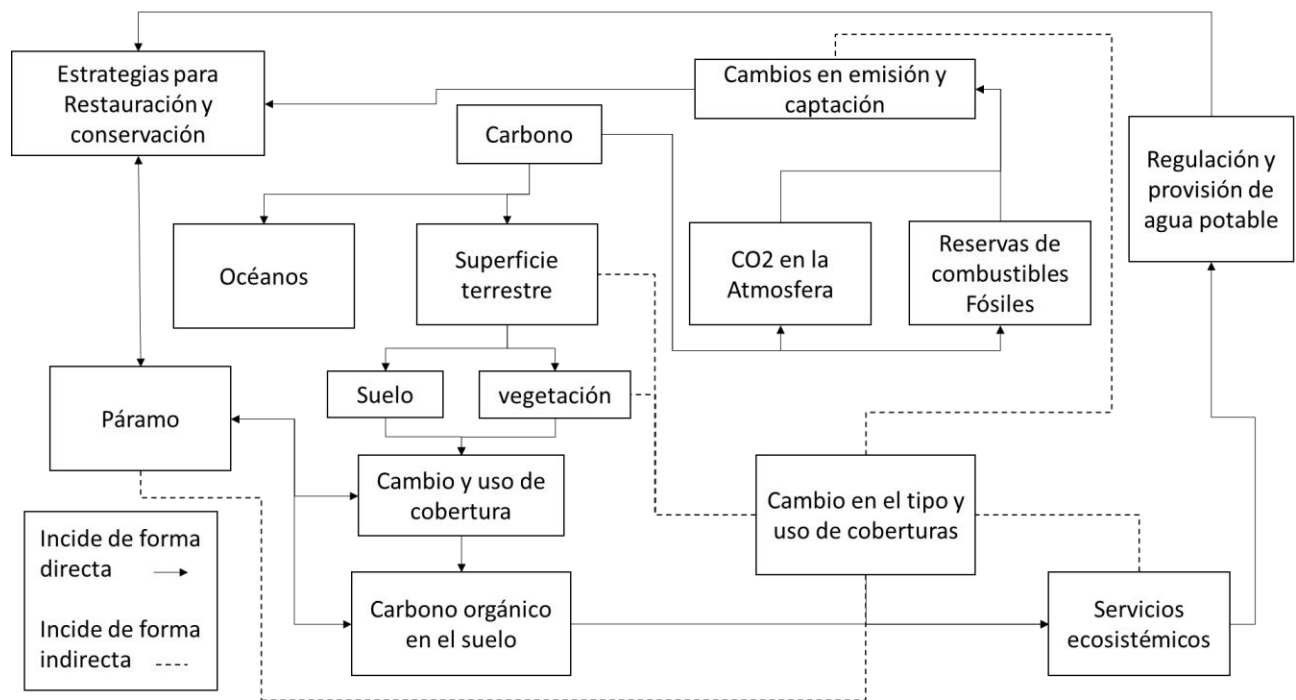
El flujo neto de CO<sub>2</sub> del ecosistema a la atmósfera, hace parte de la productividad primaria neta (PPN), que es el resultado de la productividad primaria bruta (PPB) menos la respiración (PPN = PPB – Respiración) del ecosistema (Reichstein et al., 2005; Lasslop et al., 2010; Carrillo-Rojas et

al., 2019). Utilizado para brindar información fiable sobre los intercambios de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, donde se considera la PPB como el flujo de CO<sub>2</sub> global cuantitativamente más importante (Beer et al., 2010; Carrillo-Rojas et al., 2019). Mediante la difusión a través de los estomas, el CO<sub>2</sub> atmosférico es adquirido por las plantas y transportado por los cloroplastos, conocido como productividad primaria bruta (PPB), y al mismo tiempo, una porción de este gas regresa a la atmósfera por medio de la respiración (Rh) autotrófica (V. J. Jaramillo et al., 2004; Granja, 2015). Se ha estimado que la PPB global es 120 PgC/año. La mitad de la PPB (60 PgC/año) se incorpora en los tejidos vegetales, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO<sub>2</sub> debido a la respiración autotrófica (Murcia-Rodríguez & Ochoa-Reyes, 2008). En el caso de la respiración en los suelos, está definida como la producción total de CO<sub>2</sub>, por unidad de área y de tiempo, en donde los suelos intactos, se calcula a partir de la respiración de organismos edáficos, hifas, micorrizas, raíces y en menores cantidades, por la oxidación química de los compuestos de carbono (Raich et al., 1991; Lloyd & Taylor, 1994; Yi et al., 2007; Murcia-Rodríguez & Ochoa-Reyes, 2008). Por otra parte, las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los suelos se puede deber por la combustión de fuegos naturales o antropogénicos, que en la actualidad se utiliza para la eliminación de coberturas naturales, para su posterior explotación agrícola (R. Hofstede et al., 2001; V. J. Jaramillo et al., 2004; Granja, 2015). La diferencia entre la fijación de carbono por la PPN y las pérdidas por la Rh en ausencia de otras perturbaciones, en este caso, la quema de coberturas, se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE) (V. J. Jaramillo et al., 2004; Granja, 2015). Al contemplar todas las pérdidas de carbono en por diferentes procesos antrópicos como la quema, la cosecha o la remoción, así como también, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el carbono que la biosfera acumula a nivel global, y esto se conoce como producción neta del bioma (PNB)

Los suelos de páramo son, por lo general, de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos, con pH entre 3.9 y 5.4 (Guhl Nimitz, 1982). Estos suelos, son ricos en humus bien descompuesto, de acidez considerada, enmohecido y de color pardo oscuro o negro, con un espesor que varía entre algunos centímetros y un metro (Suárez, 1989; Ortiz et al., 2005). Esto se debe, como se ha venido mencionando, a la baja descomposición de materia orgánica que ocurre en el páramo y su alta humedad (R. Hofstede & Robert, 1995; Ortiz et al., 2005).

Por otra parte, gracias a estas condiciones, esta gran capacidad de asimilación de materia orgánica del suelo de páramo, se debe a la interacción con partículas minerales del suelo (Al<sup>3+</sup>; Fe<sup>3+</sup>) (Wagai et al., 2015). El aluminio y el hierro, provienen de la descomposición de la ceniza volcánica y roca, dando como resultado suelos ricos en humus y una estructura porosa (Shoji et al., 1994; Castañeda et al., 2017). Así mismo, gracias a esto, los suelos tienen cantidades elevadas de materia orgánica, alrededor de 100 g Kg<sup>-1</sup>. En sitios húmedos, con una precipitación mayor a los 900 mm al año, es frecuente el contenido de carbono mayor a 40% (Buytaert et al., 2006), haciendo de este ecosistema, un reservorio terrestre ideal de carbono en forma de materia orgánica. Algunos lugares con depósitos de cenizas se caracterizan por presentar suelos jóvenes con contenido de carbono orgánico de 4-10% (Zehetner et al., 2003; Castañeda et al., 2017). Dando como resultado un rol significativo de los páramos en el ciclo del carbono (Figura 1), gracias a sus propiedades distintivas

tanto en sus coberturas como los suelos, siendo un ecosistema estratégico para combatir el cambio climático (Goetz & Dubayah, 2011; Castañeda et al., 2017). Por otra parte, gracias al cambio de tipo y uso de cobertura, se ha venido degradando los suelos en los páramos, ya que al explotar el suelo o quitar la cobertura vegetal, se tiende a interrumpir las dinámicas entre agua y materia orgánica. Al haber menos humedad, se incrementa la descomposición que da como resultado menos materia orgánica en el suelo y, a su vez, hay menor capacidad de retención de agua (R. Hofstede, 1997). Según Hofstede (1997), el impacto negativo sobre los suelos paramunos es tan marcado, que dan como resultado, suelos volcánicos poco desarrollados (se encuentra en la mayoría de los páramos), que se secan irreversiblemente y no recuperan su morfología original cuando se vuelve a mojar.



**Figura 1.** Mapa conceptual del ciclo del carbono y sus dinámicas con relación al páramo.

En pocas palabras, el carbono orgánico del suelo es una parte del ciclo del carbono, que está relacionado con el suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera (Fernández Pérez et al., 2019). Cabe destacar, que los principales factores que inciden en la descomposición del MOS incluyen la temperatura del suelo y el contenido de agua que, a su vez, influyen en el almacenamiento de carbono en el suelo debido al efecto de la actividad microbiana. Estas relaciones, como por ejemplo bacterias-hongos, también puede influenciar la descomposición preferente de ciertos compuestos, lo que traduce a una recalcificación química de las moléculas complejas que acumulan COS, como lo es la lignina o los lípidos (Lefèvre et al., 2017, p. 56)

### **3.1.3 Clasificación de cobertura vegetal con el uso de imágenes de sensores remotos**

Los sensores remotos se refieren a la detección de energía electromagnética de aeronaves o satélites, a través del espectro electromagnético, estos espectros se pueden dividir en regiones de longitud de onda conocidas como "óptica" y "microondas". La teledetección óptica tiene como objetivo la energía reflejada y emitida por la Tierra, generalmente en longitudes de onda entre 0,4 y 14  $\mu\text{m}$ . La teledetección por microondas detecta longitudes de onda mucho más largas, entre 1  $\text{mm}$  y 1  $\text{m}$ . La radiación óptica y de microondas ocupan distintas regiones del espectro electromagnético y se detectan mediante distintas tecnologías (Turner et al., 2003). Dicho esto, los sensores remotos, o mejor conocido como teledetección, es una ciencia de vigilancia y cartografía que se ocupa de la observación y / o medición de objetos y características sin tener el dispositivo de medición en contacto directo con la entidad de interés (Weiss & Walsh, 2009). Estos sensores están se ajustan y están diseñados para ser sensibles a diferentes partes del espectro electromagnético (resolución espectral); mapear objetos y características de diferentes tamaños a través de su resolución espacial; y evaluar las características del paisaje utilizando un rango cuantitativo de intensidades de respuesta (resolución radiométrica) (Weiss & Walsh, 2009). Los sistemas de teledetección por satélite también son capaces de ofrecer vistas a lo largo del tiempo (resolución temporal) como consecuencia de sus especificaciones orbitales que conducen a una vigilancia sistemática sobre la misma ubicación geográfica (es decir, los satélites pasan de forma periódica y predecible sobre la misma ubicación en la Tierra) (Weiss & Walsh, 2009). Estos datos recolectados por diferentes satélites hacen que estos datos satelitales sean únicos en comparación con los datos de otras fuentes, en el caso de un satélite ambiental, puede proporcionar un suministro regular de datos de esas áreas del mundo produciendo muy pocas observaciones convencionales ; la atmósfera se escanea ampliamente desde la altitud del satélite y permite ver características ambientales a gran escala en una sola vista; La capacidad de ciertos satélites para ver una parte importante de la atmósfera continuamente desde el espacio los hace especialmente adecuados para la vigilancia y alerta de fenómenos meteorológicos de corta duración; y el sistema de comunicación avanzado (Jacob, 2012). Actualmente, el uso de datos de campo y la detección remota se integran para comprender mejor el uso de la tierra y los patrones de cobertura de la tierra, las características geológicas o geomórficas, las condiciones hidrológicas y las características de la vegetación (por ejemplo, área foliar, tamaño de las plantas, biomasa de las plantas y composición de especies), con el fin de tener una descripción precisa del paisaje, en este caso, es una herramienta viable para la descripción de las coberturas vegetales (Weiss & Walsh, 2009).

### **3.2 Antecedentes**

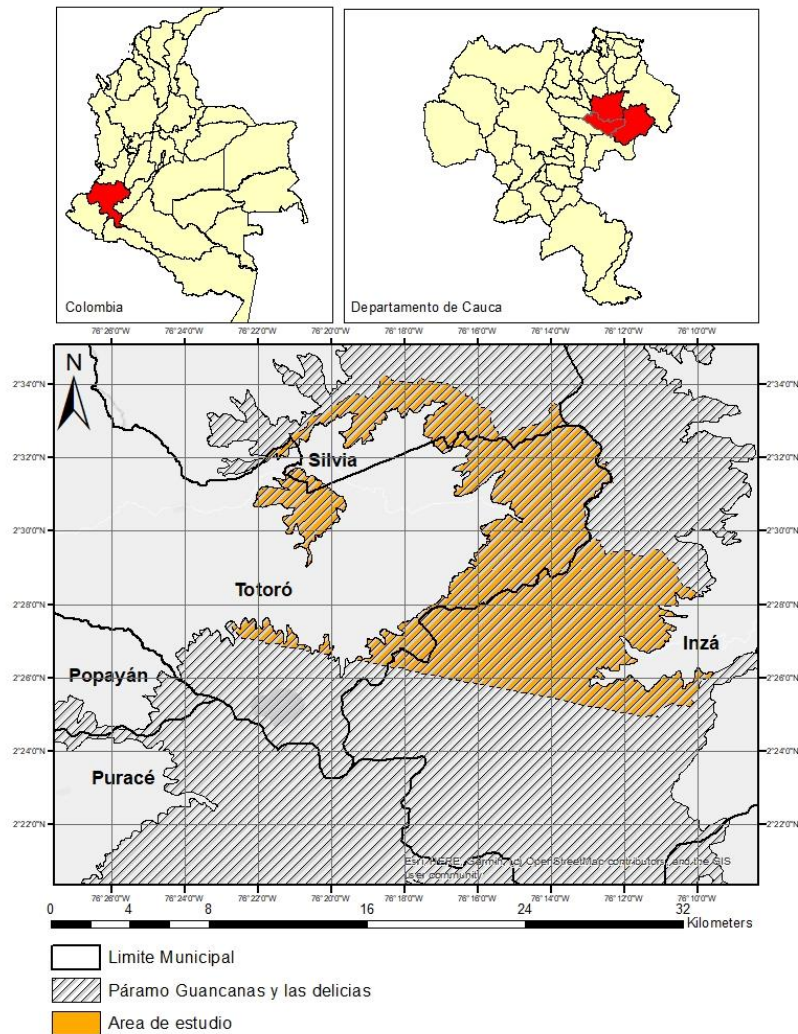
En la actualidad, se está debatiendo sobre nuevas tecnologías para avanzar en la estimación de carbono con una alta resolución, a grandes escalas, con el fin de mejorar el conocimiento y la magnitud de los cambios netos en las diferentes reservas de carbono, incluyendo el almacenado en

el suelo, dando como resultado una serie de avances en el monitoreo satelital. Si bien estas nuevas metodologías no eliminan el trabajo “in situ” de investigación, es una herramienta práctica para tener una aproximación sobre los ecosistemas (Goetz & Dubayah, 2011). Dicho esto, parte de estos monitoreos vía satélite se han utilizado en la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) para desarrollar un marco de referencia en las emisiones de carbono por el cambio de cobertura, principalmente la deforestación, para poder reconocer los efectos adversos de estas actividades sobre los ecosistemas (Meersmans et al., 2009; Houghton, 2010). Parte de los resultados obtenidos, han sido utilizados estudios similares con relación a la distribución del contenido de carbono en los suelos, la textura, porosidad y su uso, dando como resultado modelos de distribución espacial de COS (Meersmans et al., 2009). Se ha encontrado, que la distribución de COS con relación a la profundidad es variada (Meersmans et al., 2009). Diferentes estudios señalan que la biomasa de las raíces disminuye a una mayor velocidad que el COS a medida que incrementa la profundidad (Gill et al., 1999; Jobbágy & Jackson, 2000). Esto puede deberse a la consecuencia de un transporte de carbono superficial a mayores profundidades o menores tasas de descomposición de material orgánico en las capas más profundas, existiendo una posible relación entre las raíces y el contenido de carbono. Adicionalmente, el transporte de agua, la textura del suelo relacionada con la permeabilidad, la lixiviación, la mezcla y la intervención de la edafofauna en los suelos, son factores que fueron identificados y descritos como factores importantes que determinan el transporte vertical de COS (Jobbágy & Jackson, 2000; Don et al., 2007; Meersmans et al., 2009).

Existen varios métodos en la actualidad para poder estimar el contenido de carbono, que varían según los datos tomados en campo, el tiempo invertido en los análisis y el presupuesto, que depende de los instrumentos, tipos de análisis y equipos disponibles (Sleutel et al., 2007). En la actualidad, existen principalmente 2 métodos comúnmente utilizados y aún vigentes en las estimaciones de COS, el método húmedo y el método seco. El método en húmedo, mejor conocido como Walkey-Black, consiste principalmente en la oxidación de materia orgánica por dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en presencia de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) (Walkey et al., 1860; Sleutel et al., 2007). Por medio de la oxidación y reacción exotérmica, queda una muestra residual del suelo, donde se hace un cálculo sobre el carbono orgánico total. Si bien este método es más recomendado a partir de la precisión de sus resultados, es un método de costo considerable (Walkey et al., 1860; Sleutel et al., 2007). Por otro lado, el método en seco, consiste en obtener el contenido de carbono orgánico mediante la combustión de las muestras a temperaturas superiores a los  $500^\circ C$ , donde se saca el COS a partir de la diferencia entre el carbono total y el carbono inorgánico (Sleutel et al., 2007). Este último método, a pesar de no ser tan preciso como el método húmedo (Walkey-Black) es un método práctico, económico y comúnmente utilizado en proyectos con un alta labor intensiva (Benites et al., 2007; Yang, 2019; Han et al., 2020). Adicionalmente, parte de la metodología en seco del COS, es estimar la densidad aparente ( $D_a$ ), que está relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua y circulación biogeoquímica del COS, que es utilizado en la actualidad en la construcción de modelos matemáticos para el estudio de los suelos (Acutis & Donatelli, 2003; Pire, 2003; Heuscher et al., 2005; Han et al., 2020).

#### 4. Área de estudio (Incluye mapa ubicación)

El páramo de “Guanacas y las Delicias” se encuentra ubicado en el departamento del Cauca, Colombia, sobre la cordillera central de los andes entre las coordenadas geográficas (50 28’ 22,07” N, 790 5’ 50,84” W y 50 17’ 30,88” N y 790 16’ 52,84” W) a una altura de 3100 a 3600 msnm (Figura 2).



**Figura 2.** Área de estudio en el Páramo Guanacas y las delicias (Pinzón & Giraldo, 2017), dentro de los municipios de Silvia, Inzá y Totoró, del departamento de Cauca.

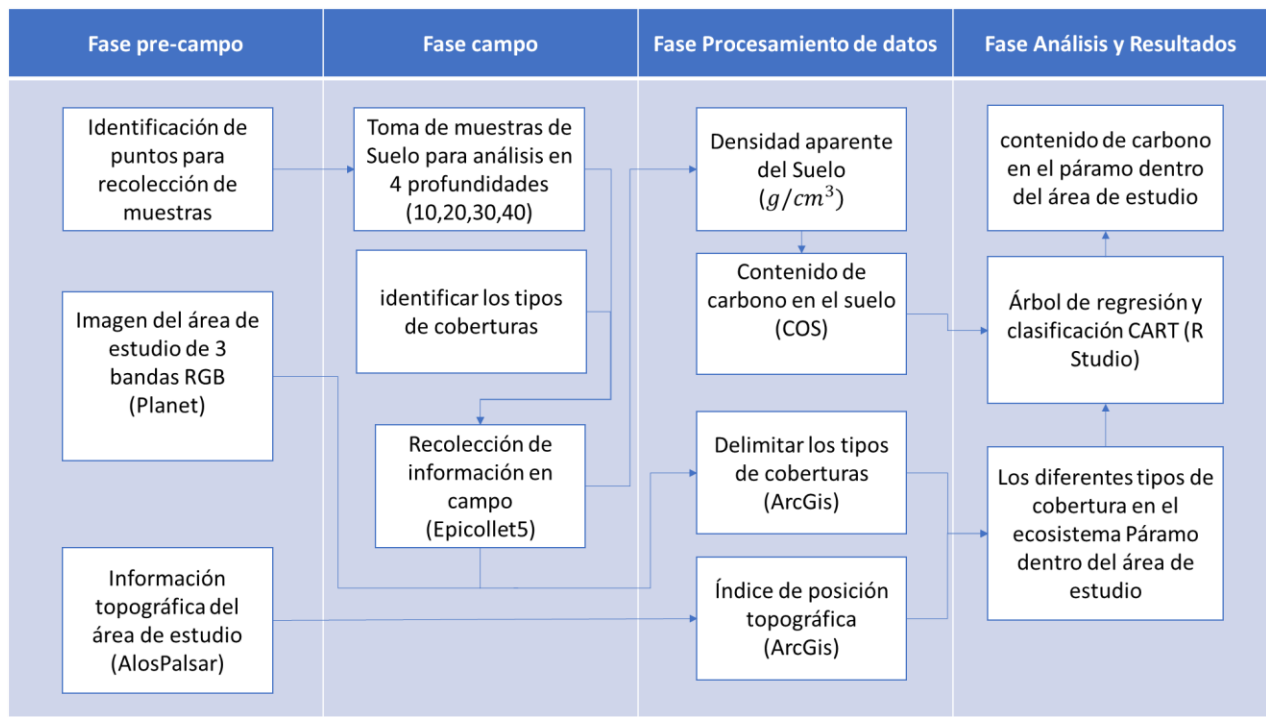
#### Contexto Biofísico y socioeconómico



En la región del páramo de Guanacas y las Delicias, los suelos son de origen volcánico, con pendientes en general de 4-20%, con una humedad alta (41%) y baja densidad aparente (0.5 g/cm<sup>3</sup>), alta retención de fosfatos (7,6 mg P/Kg), estos suelos son catalogados como andosoles (Bockheim & Gennadiyev, 2000; IGAC, 2009; J. Jaramillo et al., 2009). El clima presenta temperaturas entre los 10 y 15 °C, influenciado por fuertes vientos y heladas, con una precipitación anual de 1082 a 2750mm, Características las cuales son típicas de una región de bosque muy húmedo Montano o franja altoandina que se ubica entre 2800 – 3200 msnm, dominada por bosques, arbustos y matorrales como *Weinmannia* (encenillos), *Hesperomeles* (mortiños), *Clethra*, *Escallonia* (tibar, rodamonte) y vegetación de páramo (matorrales y arbustales) dominados por especies de *Diplostephium*, *Monticalia* y *Gynoxys* (*Asteraceae*), de *Hypericum* (*H. laricifolium*, *H. Ruscoides*, *H. Juniperinum*) de *Pernettya*, *Vaccinium*, *Bejaria* y *Gaultheria* (*Ericaceae*) (Rangel, 2002; Andres Muñoz & Pérez, 2016). El páramo Guanacas tiene aproximadamente 8611 habitantes entre indígenas y campesinos que basan su actividad económica en la ganadería extensiva (25%) y cultivo de papa (75%). Ambas actividades desarrolladas de forma tradicional e intensiva, bajo condiciones artificiales ideales para incrementar la producción en un intervalo corto de tiempo (CRC & ACUC-GL, 2010).

## 5. Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló en cuatro fases (Figura 3). Fase 1: identificación del área de estudio, Fase 2: recolección de datos, fase 3: procesamiento de datos y fase 4: análisis de los resultados. A continuación, se precisa cada una de ellas (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de procedimiento metodológico con las diferentes fases del proyecto.

## **5.2 Diseño del estudio**

### **5.2.1 Diseño de muestreo**

Los datos fueron recolectados en el 2019, en el páramo “de Guanacas y las Delicias”, dentro del municipio de Totoró. Se seleccionaron puntos distribuidos de forma aleatoria para recolectar muestras de suelo, con la condición de que los puntos no pueden tener una distancia mayor a 1 kilómetro (km) de una carretera, con el propósito de tener fácil acceso, recolección y transporte de las muestras de suelo en cada punto.

En segundo lugar, se tomaron muestras de suelo, con ayuda de un Barreno para suelos (Soils Probes), con un volumen del cilindro conocido para la toma de muestras, diseñado para suelos húmedos. Para la recolección de las muestras se removió la cobertura vegetal, para evitar contaminar la muestra, y luego, se introdujo el barreno para hacer un corte limpio vertical del suelo. Para cada corte del suelo se midió con un flexómetro la profundidad de la muestra, separando la muestra inicial, cortando a cada 10 cm de profundidad hasta los 40 cm. Se tomaron en total 424 muestras de suelo en 105 puntos, estas muestras fueron recolectadas y rotuladas con un código único para cada punto muestreado, separando en cada punto recolectado las muestras de suelo según la profundidad, para su posterior análisis en laboratorio.

En tercer lugar, se hizo una descripción de la vegetación en campo, con las siguientes variables: Tipo de cobertura, a partir del hábito de crecimiento y género de las especies encontradas, dividida en 5 categorías: Turbera, Arbustal denso, Herbazal, Potrero y Arbustal abierto para la identificación del tipo de cobertura y tipo de vegetación en cada punto.

La información obtenida en campo con relación al tipo de cobertura, tipo de vegetación, elevación (m.s.n.m) y profundidad de la muestra, fue guardada en la aplicación de celular Epicollect5 (“Big Data Institute” de la universidad de Oxford, Inglaterra). Esta aplicación, sirve para tener un control de los datos obtenidos en campo, que consiste en una plataforma que permite guardar de forma esquemática y ordenada la información con el fin de tener un control de los datos a tomar en campo y los datos obtenidos. Por otra parte, para hacer una posterior validación de los datos en la identificación de tipo de coberturas. Se tomaron fotos de la superficie donde se tomó la muestra y de la vegetación circundante al punto recolectado.

### **5.3 Análisis del suelo**

De las 424 muestras de suelo, se realizó un secado en un horno de laboratorio eléctrico a 80°C por 24 horas, ya que, al calentar las muestras por 24 horas, se elimina el agua excedente en las muestras del suelo para su posterior análisis de materia orgánica. En cada muestra recolectada se hicieron tres procesos. En primer lugar, para eliminar la humedad del suelo, se pesó la muestra recolectada en laboratorio, posteriormente se sometió a un secado inicial en un horno eléctrico por 24 horas,

en donde se saca la densidad aparente del suelo para cada muestra a partir de la diferencia entre el peso húmedo y peso seco de las muestras (Acutis & Donatelli, 2003; Pire, 2003; Heuscher et al., 2005; Han et al., 2020). Posteriormente se realizó un proceso de fragmentación física, con la finalidad de descompactar el suelo. Cada muestra se pasó por un tamiz de 2mm, siguiendo la terminología establecida por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América), que determina el tamaño de partículas del suelo (Gerakis & Baer, 1999), con el fin de excluir diferentes componentes físicos externos al suelo, como las rocas, raíces y material vegetal aún en proceso de descomposición que puedan alterar los datos de contenido de carbono, dando como resultado suelo tamizado seco (Ps) para analizar la densidad aparente. Finalmente, después de secada la muestra, se pesa y se mete en una mufla a 500 °C por 36 horas, para el posterior análisis de carbono orgánico en el suelo.

## 5.4 Datos espaciales

Se utilizó una imagen satelital de 3 bandas multiespectral básica con escenas orto rectificadas. Esta imagen fue tomada por el satélite Planet Scope 3-Band y fue descargada en Planet developer center (Planet Labs Inc., USA). Una resolución de 7 metros<sup>1</sup> y proyectada en UTM 18 N, usando el datum WGS84. Por otra parte, el proceso que Planet developer realizó en esta imagen fue para remover distorsiones causadas por el terreno para uso cartográfico, que adicionalmente, las orto escenas, que se descargaron como productos visuales (RGB), es decir, dentro del espectro electromagnético está dentro del rango de la luz visible. Esta cubre todos los colores, desde el azul a 400 nm, al rojo a 700 nm. Adicionalmente, son escenas con corrección radiométrica, sensorial y geométrica en una proyección cartográfica de mapas. La corrección geométrica utiliza modelos de elevación digital (DEM) finos con un espaciamiento entre 30 y 90 metros. Los puntos de control terrestre (GCP) se utilizan en la creación de cada imagen. Esta imagen fue tomada el 5 de febrero del 2020.

Orden de banda del producto:

- Banda 1 = Roja
- Banda 2 = Verde
- Banda 3 = Azul

Para la toma de datos topográficos se realizó un índice de posición topográfico a partir del modelo digital de elevación (Dem por sus siglas en inglés) tomada por el satélite ALOS PALSAR en la página Alaska Satellite Facility (Nasa, Usa). A partir del Dem, se sacaron 4 capas: Pendiente; que determina los grados de inclinación que tiene cada píxel. Plano y Perfil, encargadas de determinar la concavidad del área de estudio, rugosidad; que determinar surcos o marcas en la superficie

---

<sup>1</sup> Para el análisis espacial a realizar con esta imagen, se cambió a una resolución de 7 metros, debido a problemas en el procesamiento de la imagen.

resultado de diferentes agentes, como lo es el clima. Estas capas estaban en una resolución original de 12.5 metros, sin embargo, se cambió a una resolución de 7 metros sin interpolación para coincidir con la misma resolución de las coberturas identificadas previamente.

## 5.5 Datos de carbono orgánico del suelo

Para la estimación de contenido de carbono orgánico del suelo (COS) es necesario hacer una previa estimación de la densidad aparente del suelo, calculado a partir del peso seco del suelo sobre el volumen de la muestra (Acutis & Donatelli, 2003; Pire, 2003; Heuscher et al., 2005; Han et al., 2020). Dicho esto, para estimar las reservas de COS del suelo, se hace un cálculo a partir de la profundidad de la muestra (cm) por la densidad aparente del suelo por el resultado de carbono eliminado por combustión, y para una mayor precisión se agregar el factor de gravas o rocas mayores a 2mm (Lefèvre et al., 2017, p. 39). En este estudio, se utilizó el método seco para la estimación de COS, esta metodología resulta rápida, precisa y económica para los suelos de páramo en general, ya que bajo otros parámetros, sirven para diferenciar el carbono orgánico del carbono inorgánico, sin embargo, en el caso del páramo no es necesario porque se ha reportado que hay una ausencia de carbonatos en los suelos volcánicos de la región andina, por lo que se asume que el carbono total es el mismo carbono orgánico (Tonneijck et al., 2010; Hribljan et al., 2016)

$$Da (g/cm^3) = \frac{Ps}{Vc}$$

$$COS(g/cm^2) = P * Da * (Ps - Cr) * Fc$$

donde:

Da = Densidad aparente del suelo

Ps = Peso seco de la muestra de suelo (g)

Vc = Volumen del cilindro del barreno ( $cm^3$ )

COS = carbono orgánico del suelo( $g/cm^2$ )

P = profundidad del horizonte (cm)

Cr = Carbono resultante después de la combustión del suelo a  $500^{\circ}C$  (g)

Fc= sustracción de gravas y piedras ((1 – piedras %) \*100)

## 5.6 Análisis estadístico y espacial

### 5.6.1 Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico se realizó una prueba de normalidad Shapiro-Wilk para determinar la distribución de los datos del contenido de carbono (Shapiro & Wilk, 1965). Para el análisis de los resultados en el contenido de carbono y estimar las variaciones en comparación con las diferentes características topográficas y el tipo de cobertura, se realizó un árbol de clasificación y regresión (Breiman et al., 1984; De'Ath & Fabricius, 2000; Zheng et al., 2009), si bien este modelo se ha utilizado en estimaciones de CO<sub>2</sub> a partir de diferentes características físicas del suelo, en este caso se va a realizar una estimación de COS a partir de datos tomados en campo.

Para encontrar las relaciones e interacciones entre las diferentes variables (rugosidad, plano, perfil, pendiente, elevación y tipo de cobertura) con relación al COS. Se utiliza el algoritmo CART con un enfoque modelado no paramétrico que puede explicar las respuestas de un conjunto de variables continuas o variables categóricas (Zheng et al., 2009). Este modelo, permite dividir de forma recursiva los datos en subconjuntos de datos cada vez más homogéneos, basado en un criterio de división de variables independientes utilizando algoritmos que minimizan la varianza.

Los datos dependientes (Nodo padre en los árboles de decisión) se dividen en una serie de nodos secundarios (Nodos hijos), una vez que ha terminado la partición, los nodos secundarios se catalogan como nodos terminales (Breiman et al., 1984; Zheng et al., 2009). En este estudio, se utilizaron árboles de regresión para predecir el carbono orgánico del suelo con relación a las variables físicas del paisaje, como lo es: plano, perfil, pendiente, rugosidad, elevación y tipo de coberturas. Se escogió el método de ANOVA para el árbol de regresión con una reducción proporcional mínima del error (PRE) en cualquier división de 0.05 y un mínimo de 5 datos permitidos en cualquier nodo. Se hizo una comparación de medias entre los valores observados vs los modelados para determinar la precisión del modelo (Zheng et al., 2009). Para determinar la precisión de modelo se hace una prueba de diferencias de medias (Zheng et al., 2009)

### 5.6.2 Análisis Espacial

El análisis espacial utilizado en el área de estudio fue la clasificación supervisada, que consta principalmente en analizar y clasificar una imagen ráster, compuesta de diferentes bandas, en este caso, 3 bandas (RGB). El objetivo de hacer una clasificación supervisada es poder obtener una imagen clasificada según el tipo de cobertura. En un principio, a partir de los datos recolectados en campo e información obtenida por las fotos tomadas de los puntos, se capacitó el modelo para definir los diferentes tipos de coberturas, a partir de datos previamente identificados en campo, como lo es el tipo de cobertura. Esto es gracias a que el modelo comienza a diferenciar y catalogar las firmas espectrales obtenidas de la imagen satelital. Después, para asegurarse que las clases (tipo de cobertura) sean distinguibles, se hace un análisis manual de la distribución de las coberturas con respecto a las firmas espectrales. Por último, al tener las clases plenamente

diferenciadas, se corre el modelo con el fin de tener una imagen catalogada en tipo de cobertura o tipo de vegetación.

Según Rangel (2000) y un estudio de la universidad del Cauca (Mileth, 2009), en el páramo Guancanas y las delicias, la variedad micro topográfica y las características eco climáticas, como lo es la radiación, precipitación, micro relieve y exposición, han establecido mosaicos de vegetación. Dicho esto, se han identificado y catalogado diferentes tipos de coberturas típicas de este páramo, que están previamente definidas por características fisionómicas y ecológicas. A partir de esta clasificación, se caracterizó las diferentes coberturas presentes en el área de estudio.

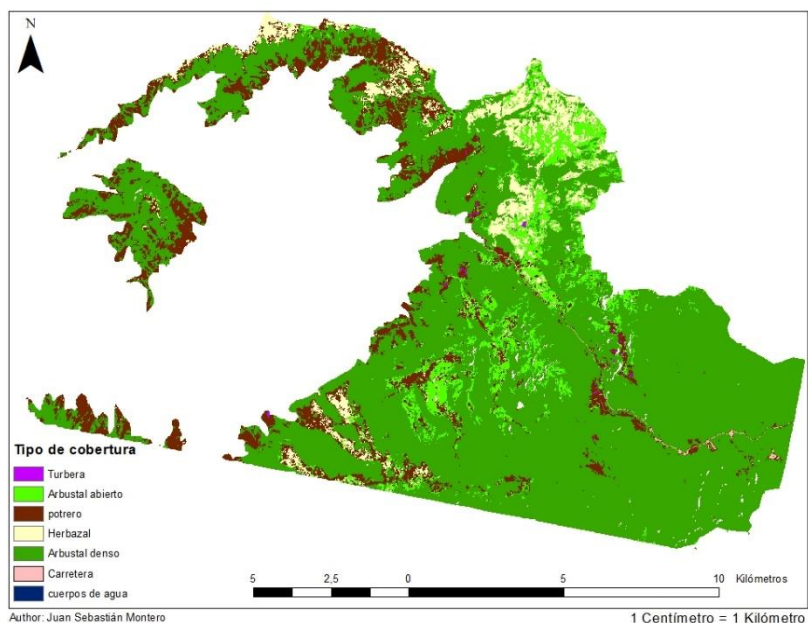
Por otra parte, después de obtener nuestra imagen catalogada, se realiza un post- procesamiento de la imagen que consta de 3 etapas. En primer lugar, pueden existir algunos píxeles aislados mal clasificados o unas muy pequeñas regiones de píxeles, lo que da como resultado una imagen con una apariencia demasiado fragmentada o con mucho “ruido”, en este caso, se procede a eliminar dicho “ruido” y mejorar la imagen clasificada a través de la herramienta filtro de mayoría (“Majority Filter tool”) de ArcGis. En segundo lugar, para suavizar los bordes irregulares de los límites de cada clase y agrupar las diferentes clases, se utiliza la herramienta limpieza de límite (“Boundary Clean”) para aumentar la coherencia espacial de las clases, uniendo diferentes tipos de clases si son adyacentes y si pertenecen a la misma clase. Por último, se pasa por un proceso donde se elimina pequeñas regiones aisladas de la imagen clasificada. Las regiones que son más grandes que una cierta cantidad de píxeles permanecerán en la imagen. Se utiliza las herramientas “Region Group”, “Set Null” y “Nibble” para realizar esta tarea, en la aplicación ArcGis.

### **5.7 Software**

Los análisis estadísticos fueron realizados por el programa SPSS (Michigan, USA). Los análisis espaciales fueron realizados por ArcGis 10.6 (ESRI Company, California, USA).

## **6. Resultados**

A partir de la clasificación en los tipos de vegetación según Rangel (2000) y Mileth (2009), se encontraron 5 tipos de vegetación en el modelo de clasificación supervisada. Si bien no hay una marcada diferencia entre los tipos de vegetación con relación a los géneros encontrados, esta caracterización se hizo a partir de los géneros representativos y hábitos de crecimiento en los diferentes tipos de vegetación, tal y como se evidencia en la Figura 4.



**Figura 4.** Modelo espacial de clasificación supervisada de tipos de coberturas en el área de estudio dentro del páramo Guancanas y las Delicias, catalogado en 7 tipos de cobertura a una escala 1:100000.

Arbustal Denso o bosques achaparrados: Compuesta por plantas vasculares, vegetación arbustiva, con un estrato de árboles de 8 a 10 metros de altura, de crecimiento leñoso, compuesto principalmente de los géneros *Hesperomeles*, *Escallonia* y *Polylepis* (Rangel-Ch, 2000; Mileth, 2009)

Arbustal Abierto o matorrales: Compuesto por plantas vasculares, vegetación arbustiva, con predominio de elementos leñosos, de los géneros *Diplostephium*, *Pentacalia*, Castilleja e *Hypericum*. A diferencia del arbustal denso, este tipo de vegetación presenta una mayor cobertura de vegetación de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis* (Rangel-Ch, 2000; Mileth, 2009).

Herbazal o vegetación herbácea: Caracterizada por poseer plantas no vasculares, dominada por gramíneas en macollas, compuesto principalmente del género *Calamagrostis* y *Agrostis* (Rangel-Ch, 2000; Mileth, 2009).

Turberas o agrupaciones de plantas vasculares en cojín: Predomina el estrato rasante o estratos herbáceos con pobre cobertura, se encuentran principalmente colchones del género *Distichia*, Cojines de *Oreobolus*, Almohadillas del género *Azorella* y cojines del género *Arenaria* (Rangel-Ch, 2000; Mileth, 2009).

Potreros: Principalmente coberturas con ausencia de vegetación nativa o muy poca vegetación, producto de una posible explotación actual o pasada con fines comerciales, como la explotación agrícola o pecuaria.

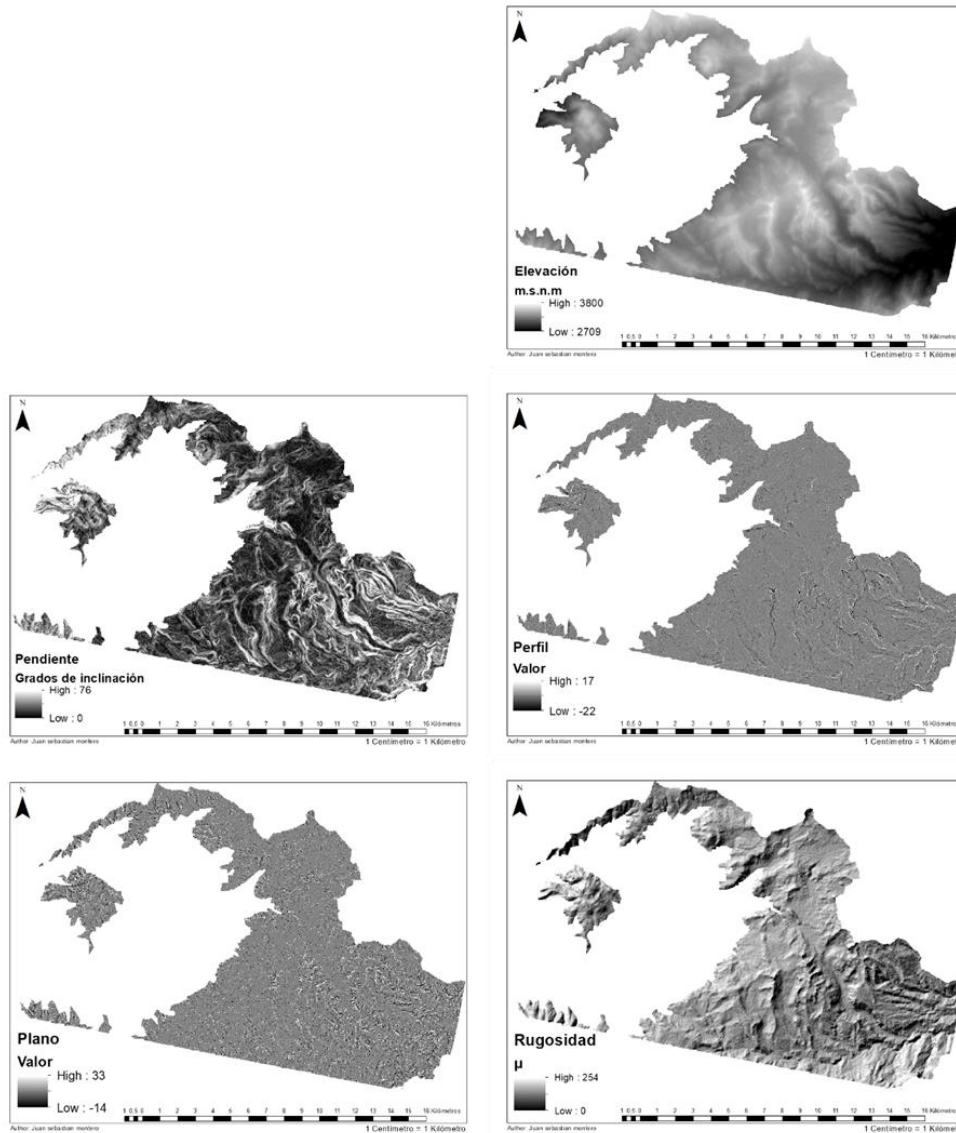


Para determinar la precisión de la clasificación supervisada, se hizo un análisis de matriz de confusión para determinar la precisión del análisis espacial, donde se encontró que el modelo espacial representa correctamente el 90.26% de las coberturas observadas en campo (Tabla 1).

Predicción	Observado					Total
	Tu	Aa	Po	He	Ad	
Tu	16	0	0	0	0	16
Aa	0	196	16	0	4	216
Po	0	0	52	1	0	53
He	0	4	4	96	0	104
Ad	0	0	4	8	20	32
Total	16	200	76	105	24	421

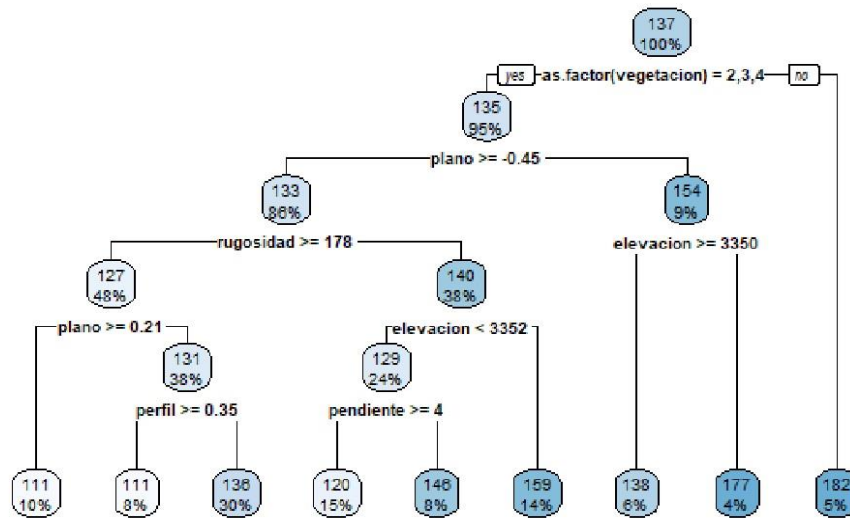
**Tabla 1.** Matriz de confusión entre los tipos de cobertura observados vs los modelados. En las coberturas de Turbera (Tu), Arbustal abierto (Aa), Potrero (Po), Herbazal (He) y Arbustal denso (Ad).

A partir del modelo digital de elevación (DEM), se sacaron 4 capas resultados, que en conjunto con la elevación describen las características físicas del paisaje: Plano, Perfil, Rugosidad, Pendiente y elevación (Figura 5).



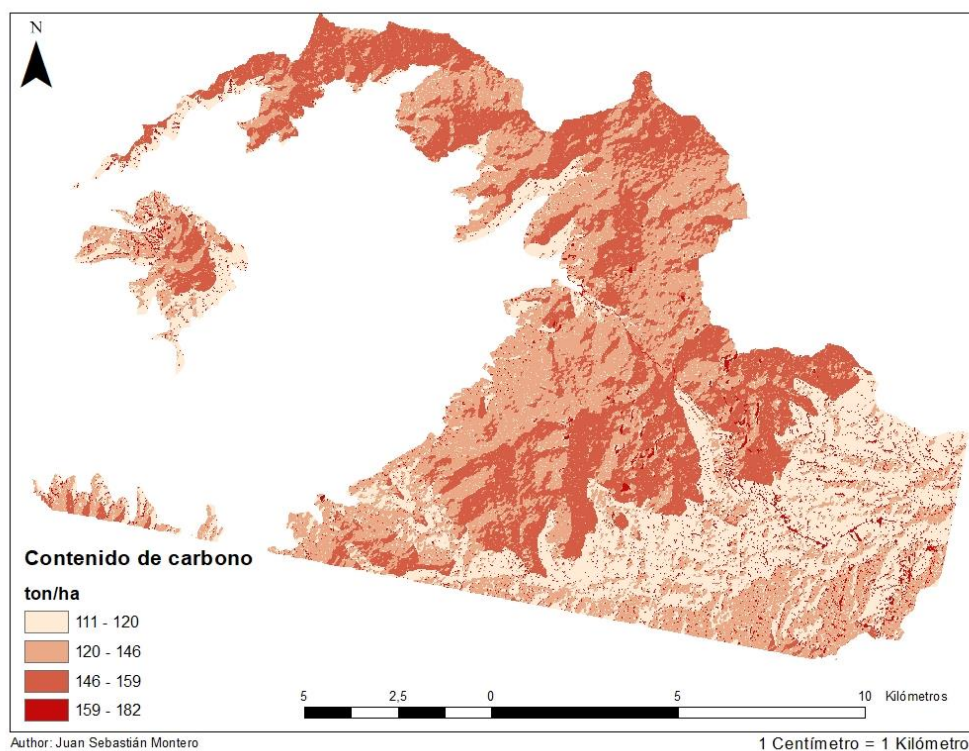
**Figura 5.** Capas de las características físicas del paisaje sacadas a partir del DEM, a una escala 1:100000 con una resolución de 7 metros.

Al combinar las diferentes capas (Figura 5 y Figura 4) y tener los valores de los suelos muestreados con relación al contenido de COS, se obtuvo un árbol de regresión (método CART) con 9 nodos terminales (Figura 6).



**Figura 6.** árbol de regresión (CART) con relación a las 7 capas base. La vegetación 2,3,4 son Arbustal abierto, Potrero y Herbazal respectivamente. Para este modelo se promedió el CO2 en cada grupo de datos, los grupos albergan 5 datos de COS obtenidos en campo.

Con relación al árbol de regresión (CART) y las capas descriptivas de las características físicas del área de estudio, se obtuvo una proyección del contenido de carbono, solapando y asignando los valores correspondientes según las condiciones de cada píxel en las diferentes capas, se hizo una conversión a partir de los datos en el contenido de carbono obtenidos de los suelos (g/cm<sup>3</sup>), donde se hizo la conversión a una mayor escala (ton/ha), teniendo una capa resultado de contenido de carbono (Figura 7).



**Figura 7.** distribución de toneladas de carbono por hectárea.

A partir de la imagen satelital, se encontró un área total de estudio de un tamaño aproximado de 17,000 hectáreas, de las cuales para el análisis de carbono se excluyó los cuerpos de agua, y este estudio se concentra únicamente en el contenido de carbono orgánico del suelo. Cabe resaltar que, dentro del área de estudio, se encontró una cobertura dominante de Arbustal denso (Tabla 2).

Cobertura	Hectáreas	Toneladas de carbono	ton/ha
Turbera	20.3203	3651.1762	179.6812153
Arbustal abierto	1352.2628	196469.6552	145.2895511
Potrerros	2109.1903	291616.7331	138.260039
Herbazal	987.1932	146065.129	147.9600234
Arbustal denso	12446.5145	1708596.469	137.2750957
Total	16915.4811	2346399.163	138.7131202

**Tabla 2.** Área de cobertura, contenido de carbono y promedio de toneladas de carbono por hectárea, a partir del modelo de regresión espacial.

A partir del resultado de COS en las diferentes coberturas se hizo un promedio de toneladas de carbono por hectárea, donde se encontró un promedio de contenido de COS similar en las diferentes coberturas. Sin embargo, se encontró un promedio alto de contenido de COS en el tipo

de cobertura Turbera (180 ton/ ha), con una diferencia significativa con respecto a las diferentes coberturas (Gráfico 1).

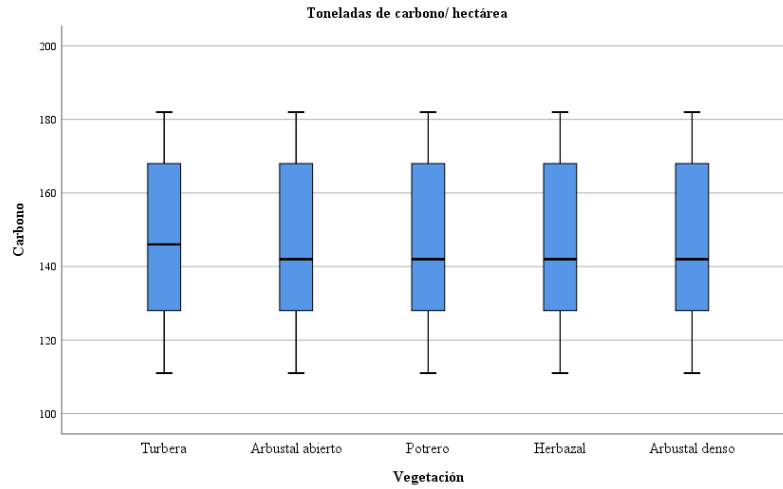


Figura 1. promedio de contenido de Toneladas de carbono orgánico del suelo por hectárea y la desviación estándar.

Para determinar la relación de los datos modelados vs los datos observados, se hizo en un principio, una prueba de normalidad de kolmogorov-smirnov para la diferencia entre los datos observados vs los modelados (Tabla 3). A partir de esta prueba, se encontró un p valor por debajo del nivel de significación ( $<0.05$ ), lo que traduce a que los datos no tienen una distribución normal, dicho esto, se hizo una prueba de Wilcoxon Mann Whitney para determinar si las medias de los datos modelados vs observados difieren entre sí, como alternativa a t-student. La prueba de Wilcoxon es una prueba no paramétrica para variables relacionadas, Como se puede observar (Tabla 4). Se encontró un p valor de 0.967 entre los datos observados vs los modelados, esto quiere decir, que el P valor es mayor de 0,05, por lo que se acepta la hipótesis alterna y por ende existe diferencias significativas en las medias de los datos observados vs el modelado.

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		diferencia
N		421
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	-,1483
	Desv. Desviación	54,58300
Máximas diferencias extremas	Absoluto	,045
	Positivo	,045
	Negativo	-,036
Estadístico de prueba		,045
Sig. asintótica(bilateral)		,044 <sup>c</sup>

- a. La distribución de prueba es normal.
- b. Se calcula a partir de datos.
- c. Corrección de significación de Lilliefors.

Tabla 3. Prueba de normalidad de Kolmogorov- Smirnov entre la diferencia de los datos modelados vs los datos obtenidos.

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Modelo - Observado	Rangos negativos	220 <sup>a</sup>	201,42	44313,00
	Rangos positivos	201 <sup>b</sup>	221,48	44518,00
	Empates	0 <sup>c</sup>		
	Total	421		

- a. Modelo < Observado
- b. Modelo > Observado
- c. Modelo = Observado

#### Estadísticos de prueba<sup>a</sup>

	Modelo - Observado
Z	-,041 <sup>b</sup>
Sig. asintótica(bilateral)	,967

- a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
- b. Se basa en rangos negativos.

Tabla 4. Prueba de comparación de medias “Wilcoxon Mann Whitney” entre los datos observados vs los datos modelados.

Se hizo un análisis posterior para determinar si existe una diferencia significativa entre los diferentes tipos de coberturas, por lo cual se hizo una ANOVA de un factor entre los tipos de coberturas y el contenido de carbono modelado (Tabla 5). Los resultados indican que en el tipo de cobertura Turbera (M = 147.29, DS = 27.1) tuvo una media diferente en comparación a las otras coberturas (M = 146.13).

### Descriptivos

Carbono	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Turbera	7	147,29	27,128	10,253	122,20	172,37	111	182
Arbustal abierto	8	146,13	25,329	8,955	124,95	167,30	111	182
Potrero	8	146,13	25,329	8,955	124,95	167,30	111	182
Herbazal	8	146,13	25,329	8,955	124,95	167,30	111	182
Arbustal denso	8	146,13	25,329	8,955	124,95	167,30	111	182
Total	39	146,33	24,272	3,887	138,47	154,20	111	182

### ANOVA

Carbono	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	7,738	4	1,935	,003	1,000
Dentro de grupos	22378,929	34	658,204		
Total	22386,667	38			

Tabla 5 ANOVA de un factor entre el tipo de cobertura y el contenido de carbono modelado (ton/ha)

Dando como resultado final, en un área de aproximadamente 17000 hectáreas un contenido total de carbono en los primeros 40 centímetros de profundidad del suelo: 2346399 toneladas de carbono orgánico.

## 7. Discusión

A partir de los datos obtenidos de las diferentes coberturas con relación a las toneladas de carbono por hectárea (Tabla 2), no se encontró una diferencia significativa entre las diferentes coberturas (Tabla 5), esto puede deberse a que dentro de los diferentes géneros encontrados existe una gran variación en los procesos de captura y emisión de carbono (Ayala et al., 2014). Estos procesos hacen parte de un sistema de cuatro reservorios en: vegetación aérea y radicular, materia en descomposición, suelos y productos forestales, con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes y estrechamente interrelacionados (De Petre et al., 2005; Cargua et al., 2014). Esto quiere decir, que, si bien los hábitos de crecimiento y los géneros representativos pueden tener

diferencias marcadas en la composición vegetal con relación a las otras coberturas, puede existir una homogeneidad en los procesos relacionados al ciclo del carbono. Por otro lado, esto se contradice según lo obtenido por Ayala et al. (2014), donde se ha encontrado una marcada diferencia entre el tipo de vegetación arbustivo y páramo herbáceo, pues se evidencian 153,86 ton/ha en la biomasa y 5,19 ton/ha en la necromasa del páramo arbustivo; y, 115,30 ton/ha en la biomasa y 0,87 ton/ha en el páramo herbáceo. Esto se debe a las variaciones de concentración de carbono en la biomasa, la cual depende de la composición de especies leñosas que presentan hojas coriáceas. Donde se ha encontrado una diferencia en el contenido de carbono en comparación al páramo herbáceo que son de consistencia carnosa (Lefèvre et al., 2017, p. 56), esto traduce, que parte de la biomasa presente en las diferentes coberturas funcionan como reservas o entradas de carbono al suelo en forma de materia orgánica, y por ende, según la materia orgánica disponible podría existir una diferencia significativa en el COS (R. Hofstede, 1997; Ayala et al., 2014). En general, el promedio de contenido de carbono supera lo encontrado en estudios similares en el COS (Farley et al., 2013; García et al., 2019).

En el promedio del contenido de carbono modelado (Gráfico 1), se encontró un promedio de contenido de carbono idéntico, entre el tipo de cobertura de Potrero ( $m= 146.13$ ) con relación a las otras coberturas, a excepción de la cobertura Turbera ( $m= 147.29$ ). Donde diversos estudios (Aase & Pikul, 1995; Lewis & Nyamulinda, 1996; Gerd Dercon et al., 2003), han encontrado que las actividades agrícolas disminuyen el contenido de carbono almacenado en los páramos. Por medio de la eliminación de vegetación nativa que reduce el ingreso de la materia orgánica en el suelo y a su vez, se incrementa la tasa de descomposición de residuos vegetales, así como la adición de cal agrícola y dolomita, liberando CO<sub>2</sub>(Post & Kwon, 2000; G. Dercon et al., 2007; Castañeda et al., 2017). Adicionalmente, se ha encontrado que, en los cultivos por medio de la translocación del suelo por la labranza y el agua, se ha promovido una disminución de la pendiente de los campos con el tiempo, formando las denominadas “terrazas de formación lenta”(G. Dercon et al., 2007). Las cuales disminuye el riesgo de erosión hídrica, pero al mismo tiempo puede conducir a la exposición del subsuelo en el borde de la pendiente ascendente del campo, con efectos potencialmente perjudiciales sobre la fertilidad del suelo (Aase & Pikul, 1995; Lewis & Nyamulinda, 1996; Gerd Dercon et al., 2003; G. Dercon et al., 2007). Esto quiere decir que, si bien existe información previa con respecto a la pendiente, plano y perfil, a una escala de paisaje (Figura 5), en una escala mas fina puede existir variaciones de estas capas, que podrían afectar los datos estimados de COS, como también el modelo espacial.

En los resultados obtenidos con relación al contenido de carbono en el tipo de cobertura de turbera, se encontró una diferencia en el promedio de contenido de COS, con respecto a las demás coberturas (Tabla 5). Evidenciando en promedio un alto contenido de carbono, esto puede deberse a que en los páramos se han encontrado turberas son grandes depósitos de carbono, llegando a tener una profundidad mayor a los 5 metros de profundidad y menor a los 10 metros de profundidad(R A Chimner & Karberg, 2008; Hribljan et al., 2016). Adicionalmente, se ha



encontrado que las turberas, podrían contener mucho carbono como en la vegetación de la superficie, así como en el suelo (Rodney A Chimner et al., 2019). Sin embargo, en suelos de turba, la determinación de la reserva de COS es bastante difícil. Para el caso de turba es necesario conocer la extensión de la turba (área), tipos de turba, su profundidad, el porcentaje de carbono y la densidad aparente, los cuales son difíciles de obtener (Lefèvre et al., 2017, p. 39). lo que da a entender que puede existir un posible error en los cálculos de COS, existiendo la posibilidad que los datos cambien según la metodología implementada, que en este caso, podría servir el método en húmedo de Walkey-Black (Walkey et al., 1860; Sleutel et al., 2007). Corroborando, que el método de combustión para la estimación de COS en las turberas podría ser ineficiente (Hribljan et al., 2016). Por otra parte, se ha encontrado una mayor variación de contenido de COS en el tipo de cobertura de turbera ( $D_s=27.1$ ) en comparación a las demás coberturas ( $D_s=25.3$ ), esto se puede deber a la gran disposición de material mineral y cenizas en las turberas, lo que altera directamente el COS por las interacciones físico-químicas (R A Chimner & Karberg, 2008). Cabe mencionar que, los estudios sobre turberas a partir de imágenes satelitales en ecosistema de alta montaña son aún muy pocos, esto se debe al pequeño tamaño, las nubes densas y la compleja topografía que hace un reto identificar las turberas (Weiss & Walsh, 2009; Otto et al., 2011; Hribljan et al., 2016; Rodney A Chimner et al., 2019), lo que permite que exista una discrepancia en la estimación de la cobertura de Turbera.

A partir de los resultados obtenidos del árbol de regresión (CART), se encontraron resultados con sesgos sobre las coberturas de arbustal abierto, potrero y herbazal, donde hay una homogeneidad en la estimación del contenido del carbono, dándole a las 3 coberturas un valor idéntico (182 ton/ha) (Figura 6), esto puede deberse a las limitantes del propio modelo en el análisis de la distribución de los datos tomados (Zheng et al., 2009), además, existe la posibilidad que las coberturas previamente identificadas quedaron mal catalogadas en la clasificación supervisada, debido a las diferentes propiedades de la superficie (Estructura, química, y física), la rugosidad de la superficie, ángulo de incidencia, intensidad y la longitud de onda de la energía irradiada (V. Radha Krishna Murthy, 2004). Pero al contrastarlo con la matriz de confusión (Tabla 1), el modelo cataloga de forma correcta el 90.26% de los datos observados, son pocas las probabilidades de que la clasificación supervisada de los diferentes tipos de coberturas, sean erróneas. Por otro lado, al comparar las medias de los datos obtenidos vs los datos modelados (Tabla 4), se obtiene que existe una diferencia significativa entre los datos ( $p = 0.967$ ) esto quiere decir que puede existir una estimación errónea del árbol de regresión CART con relación a los datos reales, bien sea subestimando o sobrestimando los datos reales posibles. Si bien este modelo es recomendado para los análisis espaciales sobre el COS, es utilizado comúnmente a partir del tipo de uso de cobertura, textura del suelo y porosidad del suelo para estimar el COS (Kern et al., 1994; Batjes, 2000; Liebans & VanMolle, 2004; Lettens et al., 2005; Meersmans et al., 2009), es posible que el modelo pierda su utilidad al poseer pocos datos, tener datos anómalos presentes y un sesgo en los datos obtenidos (Meersmans et al., 2009). Por otra parte, Jones et al (2004) encontró que, para tener un modelo más completo y detallado en la distribución espacial de carbono orgánico en el suelo es necesario hacer regresiones con relación a la distribución. Teniendo una serie de condiciones

implícitas que se relacionan con el suelo, como lo es el uso de variables climáticas (Meersmans et al., 2008). Adicionalmente, este modelo es utilizado comúnmente a partir del tipo de uso de cobertura, textura del suelo y porosidad del suelo para estimar el COS (Kern et al., 1994; Batjes, 2000; Liebens & VanMolle, 2004; Lettens et al., 2005; Meersmans et al., 2009). Por otra parte, si bien no existen diferencias significativas entre las diferentes coberturas (Tabla 5), puede resultar útil para un solo tipo de cobertura o coberturas representativas, donde podemos observar que existe una diferencia entre el tamaño de la superficie de los tipos de cobertura (Tabla 2). Si bien el análisis de medias señala que hay una diferencia significativa entre los datos observados vs los datos modelados. No quiere decir que el modelo sea propiamente impreciso, lo que podría abrir la puerta a hacer variaciones en este tipo de modelos espaciales.

Según el mapa de carbono modelado (Figura 7), a simple vista se observa una relación entre el contenido de carbono y los planos observados en la capa de pendiente (Figura 5). Esto podría deberse a que en los planos se puede almacenar agua, lo que permite una mayor descomposición de la materia orgánica, y por ende, una mayor acumulación COS (R. Hofstede et al., 2001; Lefèvre et al., 2017, p. 56). Por otra parte, al contrastar el mapa de carbono (Figura 7) con la elevación (Figura 5), se puede evidenciar en general, una relación de mayor contenido de carbono a mayores alturas, esto puede ser gracias a lo encontrado en diversos artículos, en donde se habla que a menor temperatura, mayor la capacidad de almacenamiento de materia orgánica, que está directamente relacionada con el COS (R. Hofstede, 1997; R. Hofstede et al., 2001; Buytaert et al., 2003; Robert Hofstede et al., 2003). Por otra parte, si bien no se destacan las capas de rugosidad, plano y perfil (Figura 5), se puede evidenciar (Figura 6) que cumplen un rol en el árbol de regresión CART.

Finalmente, podemos incluir, que un alto contenido en MOS proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo, lo que podría indicar que puede existir una diferencia en la cantidad de individuos identificados en una cobertura, lo que podría explicar que debido a la ausencia de este dato, la distribución de los diferentes tipos de cobertura son similares (Gráfico 1) (Lefèvre et al., 2017, p. 5). Adicionalmente, se ha encontrado en los estudios relacionado al tipo de cobertura según el género y hábito de crecimiento (Rangel-Ch, 2000; Mileth, 2009), que la materia orgánica disponible permite el crecimiento de las plantas, que en conjunto, con las características físicas del paisaje y las características climáticas (radiación, precipitación, micro relieve y exposición), determinan el establecimiento de los diferentes tipos de coberturas en los páramos (Rangel-Ch, 2000). Lo que explica la homogeneidad de la varianza en los diferentes tipos de coberturas (Tabla 5), esto podría deberse gracias a que se ha encontrado una diferencia en las características micro climáticas entre los diferentes tipos de vegetación (Carrillo-Rojas et al., 2019)

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

En conclusión, se encontró que el modelo del contenido de carbono orgánico del suelo con respecto a los diferentes tipos de coberturas de páramo y las características físicas del paisaje es poco preciso para estimar el contenido de carbono en el suelo. Sin embargo, es necesario hacer una investigación más rigurosa con relación en definir de forma precisa los diferentes tipos de cobertura, con el fin de corroborar la información. Por otro lado, es necesario tomar un mayor número de muestras de suelo con una mayor diversidad de coberturas para tener un contraste en los datos obtenidos en este estudio. Cabe destacar, que, si bien este método es poco preciso con relación a las diferentes coberturas, podría ser práctico y útil en estudios relacionados a coberturas muy homogéneas con relación al hábito de crecimiento y géneros de especies. Es importante mencionar que, a pesar de las diferentes características físicas del paisaje con relación a los diferentes tipos de coberturas identificadas a partir del género y hábito de crecimiento, no explican de forma precisa el COS, es necesario seguir haciendo modelos con modelos de regresión (CART) con el fin de identificar de forma precisa, los límites de este modelo. Finalmente, se recomienda hacer estudios similares con relación a la materia orgánica, número de individuos en los diferentes tipos de coberturas y variables micro climáticas, ya que están relacionados directamente con el COS.

## 9. Referencias Citadas

- Aase, J. K., & Pikul, J. L. (1995). Terrace formation in cropping strips protected by tall wheatgrass barriers. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(1), 110–112.
- Acutis, M., & Donatelli, M. (2003). Short communication SOILPAR 2 . 00 : software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Geoderma*, 18, 373–377.
- Andres Muñoz, F., & Pérez, H. (2016). Conflictos de uso de suelo en la frontera agrícola y áreas del paramo del municipio de totoró, Cauca. In *researchgate.net*.  
[https://www.researchgate.net/profile/Fernando\\_Munoz\\_Gomez/publication/335527585\\_Conflictos\\_de\\_uso\\_de\\_suelo\\_en\\_la\\_frontera\\_agricola\\_y\\_areas\\_del\\_paramo\\_del\\_municipio\\_de\\_Totoro\\_Cauca/links/5d6b62c392851c853883914f/Conflictos-de-uso-de-suelo-en-la-frontera-ag](https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Munoz_Gomez/publication/335527585_Conflictos_de_uso_de_suelo_en_la_frontera_agricola_y_areas_del_paramo_del_municipio_de_Totoro_Cauca/links/5d6b62c392851c853883914f/Conflictos-de-uso-de-suelo-en-la-frontera-ag)
- Avagyan, A., Karttunen, K., DeVit, C., & Rioux, J. (2015). *Learning tool on Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU)*.
- Ayala, L., Villa, M., Aguirre, Z., & Aguirre, N. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del Parque Nacional Yasuni, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. *Cedamaz*, 4(1), 45–52. [http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-12-1/art\\_5.pdf](http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-12-1/art_5.pdf)
- Batjes, N. H. (2000). Effects of mapped variation in soil conditions estimates of soil carbon and nitrogen stocks for South America. *Geoderma*, 97(1–2), 135–144.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00031-8)
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C.,

- Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luyssaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., ... Papale, D. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Benites, V. M., Machado, P. L. O. A., Fidalgo, E. C. C., Coelho, M. R., & Madari, B. E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139(1–2), 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>
- Bockheim, J. G., & Gennadiyev, A. N. (2000). The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1–2), 53–72. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00083-X)
- Bolin, B., Degens, E., Kempe, S., & Ketner, P. (1979). *The global carbon cycle*. <https://research.wur.nl/en/publications/the-global-carbon-cycle>
- Breiman, J., Friedman, C. O., & Stone. (1984). *Classification and Regres-L*.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2003). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad. *Soil and Water*, 1–26. <https://www.researchgate.net/publication/228459137>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., & Ecompar, D. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. In *Global Ecology and Biogeography* (Vol. 20, Issue 1, pp. 19–33). <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Cargua, F. E. file:///C:/Users/57314/Desktop/SebasJaveriana/Tesis/soi.texture.pdf., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., & Vinuesa, L. M. (2014). Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Informacion Tecnologica*, 25(3), 83–92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300011>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265(March 2018), 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Castañeda, M., Abel, E., Montes, P., & Carmen, R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Chimner, R A, & Karberg, J. M. (2008). Long-term carbon accumulation in two tropical mountain peatlands, Andes Mountains, Ecuador. *Mires and Peat*, 3(4), 1–10. <http://www.mires-and-peat.net/>
- Chimner, Rodney A, Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Clarke, A. M. P., Polk, M. H., Lilleskov, E. A., & Fuentealba, B. (2019). Mapping Mountain Peatlands and Wet Meadows Using Multi-Date, Multi-Sensor Remote Sensing in the Cordillera Blanca, Peru.

- Wetlands*, 39(5), 1057–1067. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1>
- CRC, & ACUC-GL. (2010). *Plan de ordenamiento y manejo de la parte alta de la subcuenca hidrográfica del río Palacé (POMCH) Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC)*.
- De'Ath, G., & Fabricius, K. E. (2000). Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 81(11), 3178–3192. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[3178:CARTAP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[3178:CARTAP]2.0.CO;2)
- De Petre, A., Ulf, K., Ali, S., & Reynero, N. (2005). Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas Proyectos de Investigación Aplicada a los Recursos Forestales Nativos (PIARFON). Área Captura de Carbono. *Banco Mundial*, 1–15. <http://infobosques.com/portal/wp-content/uploads/2016/02/Captura-de-carbono.pdf>
- Dercon, G., Govers, G., Poesen, J., Sánchez, H., Rombaut, K., Vandembroeck, E., Loaiza, G., & Deckers, J. (2007). Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology*, 87(1–2), 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.045>
- Dercon, Gerd, Deckers, J., Govers, G., Poesen, J., Sánchez, H., Vanegas, R., Ramírez, M., & Loaiza, G. (2003). Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research*, 72(1), 31–41. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00049-7)
- Dinerstein, E., Olson, D., Graham, D., & Webster, A. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. <https://sci-hub.st/https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/0-8213-3295-3>
- Dokuchaev, V. (1883). *Russian chernozem*. *St. Petersburg Evdokimova*. 15, 1–8.
- Don, A., Schumacher, J., Scherer-Lorenzen, M., Scholten, T., & Schulze, E. D. (2007). Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites - Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141(3–4), 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.003>
- Farley, K. A., Bremer, L. L., Harden, C. P., & Hartsig, J. (2013). Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: Implications for payment for ecosystem services. *Conservation Letters*, 6(1), 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00267.x>
- Fernández Pérez, C. J., Cely Reyes, G. E., & Serrano, P. A. (2019). Quantification of carbon sequestration and analysis of soil properties in natural coverages and a pine plantation in the páramo of rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 121–133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
- García, V. J., Márquez, C. O., Isenhardt, T. M., Rodríguez, M., Crespo, S. D., & Cifuentes, A. G. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, 5(10), e02701. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- Gerakis, A., & Baer, B. (1999). A computer program for Soil Textural Classification. *Plant and Soil*, 808(July 1998), 807–808.

- Gill, R., Burke, I. C., Milchunas, D. G., & Lauenroth, W. K. (1999). Relationship between root biomass and soil organic matter pools in the shortgrass steppe of eastern Colorado. *Ecosystems*, 2(3), 226–236. <https://doi.org/10.1007/s100219900070>
- Goetz, S., & Dubayah, R. (2011). Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. In *Carbon Management* (Vol. 2, Issue 3, pp. 231–244). <https://doi.org/10.4155/cmt.11.18>
- Granja, C. (2015). *Comparación de los contenidos de carbono entre la Amazonía y los páramos del Ecuador*. 53. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8737/Granja%20C. - Comparación de los contenidos de carbono entre la Amazonía y los páramos del Ecuador.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8737/Granja%20C.-Comparación%20de%20los%20contenidos%20de%20carbono%20entre%20la%20Amazonía%20y%20los%20páramos%20del%20Ecuador.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guhl Nimtz, E. (1982). *Los páramos circundantes de la Sabana de Bogotá*. [https://books.google.com.co/books/about/Los\\_páramos\\_circundantes\\_de\\_la\\_Sabana\\_d.html?id=3nGbAQAACA AJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Los_páramos_circundantes_de_la_Sabana_d.html?id=3nGbAQAACA AJ&redir_esc=y)
- Han, L., Wan, Z., Guo, Y., Song, C., Jin, S., & Zuo, Y. (2020). Estimation of soil organic carbon storage in Palustrine Wetlands, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134646>
- Heuscher, S. A., Brandt, C. C., & Jardine, P. M. (2005). Using Soil Physical and Chemical Properties to Estimate Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 51–56. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051a>
- Hilgard, E. (1911). *Soils, their formation, properties, composition, and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions*.
- Hofstede, R. (1997). La Importancia Hídrica del Páramo y Aspectos de su Manejo Por: Robert Hofstede (Coordinador Proyecto sobre la Ecología del Páramo y Bosques Andinos, EcoPar). *Core.Ac.Uk*. <https://core.ac.uk/download/pdf/48035476.pdf>
- Hofstede, R., Medina, P., & Eds, R. (2001). *El impacto de las actividades humanas sobre el páramo*. 161–185.
- Hofstede, R., & Robert, G. M. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111–132. <https://doi.org/10.1007/BF00155524>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., & Torres, F. (2014). *Los páramos andinos*.
- Hofstede, Robert, Segarra, P., & Mena, P. (2003). Los páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. In *Atlas Mundial de Los Páramos*.
- Houghton, R. A. (2007). Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 313–347. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140057>
- Houghton, R. A. (2010). How well do we know the flux of CO<sub>2</sub> from land-use change? *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 62(5), 337–351. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00473.x>
- Hribljan, J. A., Suárez, E., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2016). Peatland

- carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 113–127. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>
- IGAC. (2009). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento del Cauca. Bogotá.*
- Jacob, D. E. (2012). *The Significance of Satellite Remote Sensing and GIS Applications in The Significance of Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Meteorology. September 2014.*
- Jaramillo, J., Francisco, D., Espacial, V., Propiedades, D. E. L. A. S., Un, Á. D. E., Hidromórfico, A., & Oriente, D. E. L. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades Ándicas de un andisol hidromórfico del oriente Antioqueño (Colombia). *Universidad Nacional de Antioquia.*
- Jaramillo, V. J., Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México* (M. secretaria de medio ambiente y recursos naturales & M. Instituto nacional de Ecología (eds.)).
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Kern, J. S., Turner, D. P., & Dodson, R. F. (1994). Spatial patterns of soil organic carbon pool size in the Northwestern United States. *Soil Processes and the Carbon Cycle*, 29–43. <https://doi.org/10.1201/9780203739273>
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A., Arneeth, A., Barr, A., Stoy, P., & Wohlfahrt, G. (2010). Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16(1), 187–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>
- Lefèvre, C., Rekik, F., V, A., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo, el potencial oculto. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.* [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Lettens, S., Van orshoven, J., Van wesemael, B., Muys, B., & Perrin, D. (2005). *Soil organic carbon changes in landscape units of belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990.* 2128–2140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01074.x>
- Lewis, L. A., & Nyamulinda, V. (1996). The critical role of human activities in land degradation in Rwanda. *Land Degradation & Development*, 7(1), 47–55. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-145x\(199603\)7:1<47::aid-ldr213>3.3.co;2-d](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-145x(199603)7:1<47::aid-ldr213>3.3.co;2-d)
- Liebens, J., & VanMolle, M. (2004). Influence of estimation procedure on soil organic carbon stock assessment in Flanders, Belgium. *Soil Use and Management*, 19(4), 364–371. <https://doi.org/10.1079/sum2003215>
- Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>
- Lutelyn, J. (1999). Introduction to the páramo ecosystem. *New York Botanical Garden Press*, 1–

39.  
[https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Luteyn%2C+J.L.%2C+1999.+Introduction+to+the+páramo+ecosystem.+&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Luteyn%2C+J.L.%2C+1999.+Introduction+to+the+páramo+ecosystem.+&btnG=)
- Lützw, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions - A review. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- Maracchi, G. (1991). Agrometeorologia: stato attuale e prospettive future. *Proc. Congress Agrometeorologia e Telerilevamento*.
- McGraw-Hill, H. J.-F. of soil formation., York., N., & 1941, undefined. (n.d.). *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, New York.
- Meersmans, J., De Ridder, F., Canters, F., De Baets, S., & Van Molle, M. (2008). A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 143(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.025>
- Meersmans, J., van Wesemael, B., De Ridder, F., & Van Molle, M. (2009). Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 152(1–2), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.015>
- Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). Los suelos del páramo. In *Serie Páramo 5*.
- Mileth, K. (2009). Caracterización florística de las comunidades vegetales presentes en el páramo de las delicias, municipios de Totoró E inzá, departamento del Cauca. *Universidad Del Cauca*. [http://dx.doi.org/10.1186/s12909-016-0696-z%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.nedt.2010.03.006%0Ahttp://www.ghbook.ir/index.php?name=فرهنگ%20و%20رسانه%20های%20نوین&option=com\\_dbook&task=readonline&book\\_id=13650&page=73&chkhask=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=comp](http://dx.doi.org/10.1186/s12909-016-0696-z%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.nedt.2010.03.006%0Ahttp://www.ghbook.ir/index.php?name=فرهنگ%20و%20رسانه%20های%20نوین&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chkhask=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=comp)
- Murcia-Rodriguez, M. A., & Ochoa-Reyes, M. P. (2008). Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del bosque altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*, 30(2), 337–353.
- O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M., & Mcbratney, A. B. (2015). Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21(10), 3561–3574. <https://doi.org/10.1111/gcb.12959>
- Ortiz, M. A., Granados, D., González, J. D., Navarrete, L., & Suárez, T. (2005). Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75.
- Otto, M., Scherer, D., & Richters, J. (2011). Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1713–1727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>
- Paul, E. (2014). *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. <https://sci-hub.st/https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=gDnLAWAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP>



1&dq=Soil+microbiology,+ecology+and+biochemistry&ots=rqoFRTsVji&sig=95ym3j00I-M3MLqEBKOMETk4n4

- Pinzón, C. S., & Giraldo, M. S. (2017). *Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1: 25.000 y análisis del sistema social asociado al*. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/32539>
- Pire, R. (2003). De Uso Común En La Horticultura Del Estado. *Redalyc*, 15(1), 55–63.
- Post, W. . M., & Kwon, K. . C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3), 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *Catena*, 45(3), 185–207. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)
- Quére, C. Le, Raupach, M., Canadell, J., & Marland, G. (2009). *Trends in the sources and sinks of carbon dioxide*, *Nat*.
- Raich, J. W., Rastetter, E. B., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., Steudler, P. A., Peterson, B. J., Grace, A. L., III, B. M., Vorosmarty, C. J., Kicklighter, D. W., Moore III, B., & Vörösmarty, C. J. (1991). Potential net primary production in South America. *Ecol Appl*, 1(4), 399–429.
- Rangel-Ch, O. (2000). La región de vida paramuna. In *Universidad Nacional*.
- Rangel, O. (2002). Biodiversidad en la región del páramo: con especial referencia a Colombia. *CAR, IDEAM*.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., & Berbigier, P. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439.
- Shapiro, A. S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality ( Complete Samples ) Published by : Biometrika Trust Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2333709>. *Biometrika*, 52(3/4), 591–611.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1994). *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization*. <https://sci-hub.st/https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=IvnRg1IAPU0C&oi=fnd&pg=PP1&dq=.+Volcanic+Ash+Soils:+Genesis,+Properties+and+Utilization.+Developments+in+Soil+Science&ots=OnHYlgeXrD&sig=ZmWM94tLCXULuwhmuiaFt6hC3ws>
- Sleutel, S., De Neve, S., Singier, B., & Hofman, G. (2007). Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(19–20), 2647–2657. <https://doi.org/10.1080/00103620701662877>
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ...

- Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 164, pp. 80–99). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- Suárez, L. (1989). *El Páramo. Características Ecológicas*.
- Sundquist, E. T., & Visser, K. (2003). The Geologic History of the Carbon Cycle. *Treatise on Geochemistry*, 8–9(2000), 425–472. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/08133-0>
- Tian, Q., He, H., Cheng, W., Bai, Z., Wang, Y., & Zhang, X. (2016). Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient. *Scientific Reports*, 6(January), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep18783>
- Tiessen, H., Cuevas, E., & Chacon, P. (1994). The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. In *Nature* (Vol. 371, Issue 6500, pp. 783–785). <http://www.nature.com/nature/journal/v371/n6500/abs/371783a0.html>
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392–405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- Trumbore, S. E., Chadwick, O. A., & Amundson, R. (1996). Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 272(5260), 393–396. <https://doi.org/10.1126/science.272.5260.393>
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(6), 306–314. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- V. Radha Krishna Murthy. (2004). Crop Growth Modeling and Its Applications in Agricultural Meteorology. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, 235.
- Wagai, R., Kajiura, M., Asano, M., & Hiradate, S. (2015). Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different? *Geoderma*, 241–242, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.028>
- Walkey, A., Science, I. B.-S., & 1934, U. (1860). Determination of organic matter in water. *Journal of the Franklin Institute*, 70(5), 324. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(60\)90341-0](https://doi.org/10.1016/0016-0032(60)90341-0)
- Ward, A., Dargusch, P., Grussu, G., & Romeo, R. (2016). Using carbon finance to support climate policy objectives in high mountain ecosystems. *Climate Policy*, 16(6), 732–751. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1046413>
- Weiss, D. J., & Walsh, S. J. (2009). Remote sensing of mountain environments. *Geography Compass*, 3(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00200.x>
- Woodwell, G. M., Mackenzie, F. T., Houghton, R. A., Apps, M., Gorham, E., & Davidson, E. (1998). Biotic feedbacks in the warming of the Earth. *Climatic Change. International Journal*, March, 495–518. <https://doi.org/10.16348/j.cnki.cn61-1336/c.2015.01.001>

- Yang, R. M. (2019). Mechanisms of soil organic carbon storage response to *Spartina alterniflora* invasion and climate change. *Science of the Total Environment*, 690, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.472>
- Yi, Z., Fu, S., Yi, W., Zhou, G., Mo, J., Zhang, D., Ding, M., Wang, X., & Zhou, L. (2007). Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China. *Forest Ecology and Management*, 243(2–3), 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.022>
- Zehetner, F., Miller, W. P., & West, L. T. (2003). Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797–1809. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1797>
- Zheng, H., Chen, L., Han, X., Zhao, X., & Ma, Y. (2009). Classification and regression tree (CART) for analysis of soybean yield variability among fields in Northeast China: The importance of phosphorus application rates under drought conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 132(1–2), 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.03.004>
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D. H., Bush, M. B., Feeley, K. J., Garcia, K. C., Dargie, G. C., Farfan, W. R., Goetz, B. P., Johnson, W. T., Kline, K. M., Modi, A. T., Rurau, N. M. Q., Staudt, B. T., & Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*, 13(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>