



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS MECANISMOS DE FIJACIÓN
DE CARBONO EN SUELOS DE ALTA MONTAÑA (PAPALLACTA ECUADOR)

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación

Profesora Guía
PhD Ruth Magdalena López Ulloa

Autor
Diego Jefferson Zurita Flores

Año
2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Ruth Magdalena López Ulloa
Doctor PhD. Forestal y Suelos
C.C 1705006391

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Diego Jefferson Zurita Flores
CI: 172620348-0

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme con su amor y haberme acompañado en el trascurso de mi vida permitiendome compartir este momento de felicidad con mis seres queridos.

A mis padres por su esfuerzo para darme un futuro mejor por que siempre estuvieron conmigo brindandome su apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial al Ing. Rusbel Jaramillo y personal del laboratorio de Agrocalidad quien me dió soporte logístico y técnico y culminar con éxito los análisis. A mi tutora Magdalena López que con su guía he logrado concluir esta tesis.

DEDICATORIA

Esta tesis dedico a mis padres Mariano Zurita y Carmelita Flores que con su ejemplo y cariño me han guiado para llegar hasta este momento de mi formación profesional. A mis profesores, gracias por su tiempo y apoyo asi como por la sabiduria que me trasmitieron en el desarrollo de mi formacion profesional.

RESUMEN

La presente investigación estudia los mecanismos de fijación de carbono bajo tres coberturas vegetales en el páramo del Antisana cerca de la población de Papallacta. Las coberturas vegetales en estudio correspondieron a: bosque, pajonal y humedal, ubicadas en zona alta y baja del paisaje. Por cada tipo de cobertura vegetal se seleccionaron seis parcelas; en cada una se utilizó el método de transecto para obtener muestras compuestas de suelo a tres profundidades (0-10, 10-30 y 30-50 cm). Los parámetros de suelos analizados correspondieron a carbono orgánico, pH, conductividad eléctrica, textura, densidad aparente, densidad real, aluminio, hierro y sílice extraídos con ácido oxálico (Al_o , Fe_o y Si_o) y con pirofosfato de sodio (Al_p , Fe_p). Extractantes que permiten identificar mediante relaciones, la presencia de minerales cristalinos, amorfos y complejos humus-metal. Para identificar la vegetación dominante en cada cobertura vegetal se usó el método de puntos de intercepción en cada parcela. Los resultados obtenidos indicaron que la vegetación predominante en los bosques es el Yagual perteneciente al género *Polylepis sp*; en el pajonal se identificó la predominancia de los penachos más conocido como paja, del género *Calamagrostis Intermedia* y en el humedal se determinó la mayor presencia de almohadillas del género *Azorellape dunculata*. Para determinar qué mecanismos de fijación de carbono orgánico en el suelo del páramo es predominante se realizó un análisis de correlación con la prueba de *Pearson*; entre el contenido de Carbono (C) total para toda el área en estudio, con los parámetros físico-químicos e indicadores mineralógicos. Posteriormente se realizó el mismo análisis para el C en bosque, el C en pajonal y el C en humedal. El contenido de C para toda el área y para las tres coberturas en estudio tuvo una correlación positiva altamente significativa con arcilla, limo e inversa con la arena. El C de la cobertura de bosque presento una correlación negativa con el Fe_o y con la relación Fe_o-Fe_p , en el pajonal en cambio incremento la correlación con la arcilla a 0,77, $p < 0,000$, mientras que en el humedal el C tuvo una correlación negativa altamente significativa con el Al_o y el Al_p . Lo que indica que los mecanismos de fijación de C en el suelo dependiendo de la cobertura son diferentes. En los bosques dominan los

complejos Fe-humus, en el pajonal los complejos Al-humus-Arcilla y en el humedal la retención de C en el suelo está influenciada por las condiciones de reducción por efecto del agua en el suelo. Para establecer los factores abióticos que intervienen en la fijación de carbono en el suelo se utilizó el modelo de regresión lineal múltiple de selección por pasos (Stepwise). Este indica que el 90% de la variación de C en el área de estudio puede ser explicado por la relación inversa con los contenidos de arena en el suelo.

Palabras claves: Carbono del suelo, Mecanismos de fijación de C, Complejos metal-humus

ABSTRACT

The present research studies the mechanisms of carbon fixation under three vegetation coverages in the páramo of the Antisana near the population of Papallacta. The cover crops under study corresponded to: forest, grassland and wetland, located in the upper and lower landscape. For each type of vegetation found, six plots were selected; In each one the transect method was used to obtain composite soil samples at three depths (0-10, 10-30 and 30-50 cm). The soil parameters analyzed corresponded to organic carbon, pH, electrical conductivity, texture, apparent density, real density, aluminum, iron and silica extracted with oxalic acid (Al_o , Fe_o and Si_o) and with sodium pyrophosphate (Al_p , Fe_p). Extractants that allow to identify by means of the presence of crystalline, amorphous and humus-metal complexes. To identify the dominant vegetation in each vegetation cover, the method of intercept points was used in each plot. The results indicated that the predominant vegetation in the forests is the Yagual that belongs to the genus *Polylepis* ; In the pajonal was identified the predominance of plumes better known as straw, of the genus *Calamagrostis Intermedia* and in the wetland was determined the greater presence of pads of the genus *Azorellape dunculata*. In order to determine what mechanisms of organic carbon fixation in the soil of the moor is predominant, a correlation analysis was performed with the Pearson test; Between the total Carbon content (C) for the whole area under study, with the physical-chemical parameters and mineralogical indicators. Later the same analysis was carried out for C in forest, C in pajonal and C in wetland. The content of C for the whole area and for the three coverages under study had a highly significant positive correlation with clay, silt and inverse with sand. The C of the forest cover presented a negative correlation with the Fe_o and with the Fe_o - Fe_p ratio, in the pajonal instead increased correlation with the clay to 0.77, $p \leq 0.000$, that the wetland had a highly negative correlation Significant with Al_o and Al_l . This indicates that the mechanisms of C fixation in the soil depending on the cover are different, in the forests dominate the Fe-humus complexes, in the pajonal the Al-Humus-Clay complexes and in the wetland the retention of C in the Soil is influenced by the conditions of reduction by effect of water in the soil. In order

to establish the abiotic factors involved in carbon fixation in the soil, the stepwise multiple regression linear regression model was used. This indicates that 90% of the variation of C could be explained with the inverse relation with sand contents.

Key words: Soil carbon, C fixation mechanisms, Metal-humus complexes

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	6
ALCANCE.....	6
JUSTIFICACIÓN	7
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos	8
1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	9
1.1 El páramo.....	9
1.2 Principal vegetación del páramo.....	9
1.3 El suelo del páramo	12
1.4 Tipos de andosoles.....	13
1.5 Carbono en el Ecuador	14
1.6 Mecanismos de fijación de carbono en los suelos	15
2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	18
2.1 Caracterización del área de estudio	18
2.2 Descripción del área	19
2.3 Selección del área de estudio	20
2.4 Caracterización geográfica de las parcelas en estudio.....	21
2.5 Caracterización de la vegetación.....	22
2.6 Muestreo de suelo.....	23
2.7 Análisis de laboratorio	25
2.7.1 Determinación de pH	25
2.7.2 Determinación de carbono orgánico	25
2.7.3 Determinación de textura	26
2.7.4 Determinación de densidad real y aparente del suelo	27

2.7.5 Determinación de contenidos de al, fe y si extraído con oxalato ácido y pirofosfato.....	28
2.8 Análisis estadístico.....	30
3. CAPÍTULO III: RESULTADOS	31
3.1 Identificación y caracterización de la cobertura vegetal	31
3.2 Determinación de los mecanismos de fijación de C en el suelo.....	33
3.3 Determinación de los factores abióticos que influyen en la fijación de carbono en el suelo.....	39
4. CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	42
4.1 Cobertura vegetal.....	42
4.2 Mecanismos de fijación de carbono.....	42
4.3 Factores abióticos que influyen en la perdida de carbono	44
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1 Conclusiones	46
5.2 Recomendaciones	47
REFERENCIA	48
ANEXOS	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Carbono orgánico en el suelo del Ecuador.	15
Figura 2 Ubicación de la Parroquia de Papallacta.....	18
Figura 3 Ubicación área de estudio.....	19
Figura 4 Ubicación de los sitios de estudio	20
Figura 5 Parcelas de pajonal, humedal y bosque montano con similares condiciones biofísicas	21
Figura 6 Identificación de vegetación dominante en cada cobertura vegetal ...	23
Figura 7 Toma de muestras de suelo a tres profundidades	24
Figura 8 Secado al ambiente de las muestras de suelo	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Código de identificación de las parcelas	21
Tabla 2 Coordenadas, altitud y pendiente de las parcelas en estudio	22
Tabla 3 Nombres de las principales plantas dentro de cada cobertura vegetal.....	31
Tabla 4 Porcentaje de vegetación representativa.	32
Tabla 5 Coeficientes de correlación entre el contenido de C en el área total y en las tres coberturas (Bosque, Pajonal y Humedal) y las variables pH, Arena, Arcilla, Limo, Fe _o (%), Al _o (%), Si _o (%), Fe _p (%), Al _p (%), Al _p /Al _o , Al _o -Al _p , Fe _o -Fe _p , Al _o +1/2Fe _o	34
Tabla 6 Valores promedios de propiedades físicas y químicas del suelo para toda el área y para las coberturas bosque, pajonal y humedal.....	38
Tabla 7 Resumen del modelo 1 y 2 para estimación de C con variables físico y químicas del suelo	39
Tabla 8 ANOVA de modelos de regresión	39
Tabla 9 Ecuaciones de regresión lineal múltiple para C.....	40
Tabla 10 Resumen del modelo 1 y 2 para estimación de C	40
Tabla 11 ANOVA de modelos de regresión.....	40

INTRODUCCIÓN

Los páramos conforman un importante ecosistema a nivel sudamericano, conformando uno de los más importantes biomas en Perú, Colombia y Ecuador (Hofstede y Mena, 2008). En el Ecuador están ubicados desde los 3.000 m en la zona sur y sobre los 4.000 m en la zona centro y norte de la Cordillera de los Andes (Mena, Josse y Medina, 2001).

Es un ecosistema frágil ubicado en zonas con bajas temperaturas nocturnas, alta irradiación en el día, frecuencia de niebla y alta humedad. Estas condiciones han dado como resultado un ecosistema con una colección de flora y fauna excepcionales y singulares (Mena, Josse y Medina, 2001). El páramo es importante no solo en el aspecto biológico, sino en el hidrológico, social, económico y cultural.

Calles (2014) menciona que la expansión de la ganadería y la agricultura hacia el ecosistema ha traído daños que no se han manifestado a corto plazo, pero si a mediano y largo plazo. Así, Podwojewski, Poulénard, Zambrana y Hofstede, en el año de 2002, encontraron daños irreversibles en las propiedades físicas del suelo del páramo cercano a la ciudad de Quito, ocasionando un decrecimiento en la estabilidad del suelo, en la capacidad de retención de agua, en la estructura del suelo y por consiguiente una mayor susceptibilidad a la erosión, debido a la intervención antrópica de aproximadamente 20 años. Buytaert, De Bièvre, Wyseure, Deckers, (2005), indica que el cambio del uso del suelo en los páramos del sur del Ecuador han provocados cambios químicos, como la disminución del C en el suelo.

Entre las propiedades del suelo que se ven principalmente afectadas por cambio del uso del suelo o por el tipo de cobertura vegetal corresponde al Carbono (C) orgánico. Propiedad del suelo que tiene un papel importante principalmente en las funciones de regulación y utilidad del suelo. La permanencia del C en el suelo depende de condiciones climáticas, tipo de cobertura y características mineralógicas del suelo. Las bajas temperaturas y alta humedad en el suelo no favorecen a que la descomposición de la materia orgánica sea rápida, por

consiguiente la acumulación de C en el suelo incrementa. El tipo de cobertura vegetal, estas facilitan o retardan la degradación de la materia orgánica por acción de los microorganismos, dependiendo de las características moleculares de las plantas. La mineralogía del suelo influye en la fijación de C en el suelo por las interacciones intermoleculares de las sustancias orgánicas e inorgánicas del suelo, dadas por procesos de sorción entre las partículas orgánicas con las arcillas y sesquióxidos y la formación de complejos metal-humus a partir con iones de hierro (Fe) y aluminio (Al). Los suelos de los páramos en el Ecuador son suelos desarrollados de cenizas volcánicas, donde la fracción de arcillas está constituida principalmente por alófana pobremente cristalina, imogolita, óxidos y oxi-hidróxidos de Fe y Al, están ubicados en zonas que tienen bajas temperaturas y en general alta humedad por lo que acumulación de C orgánico es alta (Podwojewski, Poulénard, Zambrana y Hofstede, 2002).

El alto almacenamiento de C en los suelos de los páramos tiene un papel fundamental en el mantenimiento del ciclo de carbono, debido a que el suelo retiene aproximadamente el 75% de carbono terrestre; tres veces más que plantas o animales (Ecological Society of America, 2000). El C en el suelo es un indicador de la fertilidad y calidad del suelo. A pesar de ello pocos son los estudios que se han realizado para determinar cuáles son los mecanismos y factores que influyen en el almacenamiento del C orgánico en el suelo. El presente trabajo de titulación se enfoca en determinar qué factores influyen en los mecanismos de fijación de C en el suelo del páramo de Papallacta y cuál es la influencia de la cobertura vegetal.

ANTECEDENTES

El Ecuador es el país de la región Andina que más páramos tiene con respecto a su extensión total. El páramo es un ecosistema natural, dominado por pajonales, rosetales, arbustales, humedales y pequeños bosquetes. Es un ecosistema de clima frío que es muy frágil a los cambios en el uso de la tierra (Hofstede y Mena, 2008). Es un ecosistema que fija una gran cantidad de carbono, tanto en la biomasa como en el suelo (Mena, Josse y Medina, 2001).

En los páramos del Ecuador los contenidos de C en el suelo son altos y estos dependen de la ubicación en el paisaje, condiciones climáticas y tipo de material parental. En los páramos del Carchi se puede encontrar suelos que tienen una profundidad efectiva de hasta aproximadamente 2 metros, con una concentración del 17% de C, y una densidad aparente de $0,5 \text{ g/cm}^3$, se calcula que en estos suelos se almacenan 1.700 toneladas de C por hectárea. Boutaert, Deckers y Wyseure (2007) encontraron contenidos de C orgánico en el suelo que variaron desde 3,2 hasta 39,5 % en páramos al sur del Ecuador; donde la acumulación de C en el suelo es el resultado de la interacción de dos condiciones, de la inundación que depende de la posición en el paisaje y de la formación de complejos órgano-metálicos con Fe y Al liberados durante la meteorización de ceniza volcánica. Estimaciones de C similares se han encontrado a lo largo de los páramos de la Sierra Ecuatoriana (Mena, Josse y Medina, 2001).

De acuerdo a Hofstede, Segarra y Mena, en el año 2003 ya habitaban aproximadamente 500.000 personas en el páramo y lo usan habitualmente para subsistir. Actualmente existen factores que están ocasionando la pérdida de carbono de los suelos, especialmente por el cambio de uso de la tierra. En el estudio realizado por López-Ulloa (2006) identificó la pérdida del 20% de C en la superficie del suelo por mal manejo o uso indebido. Según, Houghton (1995) estimó que las emisiones de C correspondientes al cambio de uso de la tierra, por aumento de suelos dedicados a pastoreo y agricultura fueron de 140 Pg de C, con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de C. En el páramo los cambios severos del uso de la tierra y la degradación del suelo amenazan a la función de almacenamiento de C en el suelo. Sin embargo la

mineralogía y el papel que juegan las propiedades del suelo en el páramo son poco entendidas ni tampoco sus funciones son bien documentadas. Poco se conoce de como el material parental de suelos relativamente jóvenes intervienen en la fijación de C. El conocimiento de los mecanismos de fijación de C en el suelo permitirá sustentar los cálculos de contenidos de C de los páramos y poder establecer recomendaciones de manejo para mantener sus contenidos en el suelo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Son pocos los países que tienen el privilegio de contar con biomas tan valiosos como son los páramos. Ecosistema de montaña único ubicado en la zona tropical, que brinda servicios ambientales como alta biodiversidad, belleza escénica, alta fijación de C, almacenamiento y regulación de agua, entre otros. Sin embargo, estos servicios ambientales pueden ser alterados por la expansión agrícola y ganadera, que se verifica en la actualidad.

El crecimiento poblacional y la falta de tierras productivas están ocasionando que zonas frágiles como los páramos sean intervenidos, este estudio permitirá obtener información básica que ayudará a predecir la fijación de C del suelo bajo diferentes tipos de cobertura natural en la zona en estudio.

La cuantificación de C es un requerimiento fundamental para solicitar pagos por servicios ambientales. Alternativa económica que permite a los habitantes cercanos a estos ecosistemas, conservarlos en su estado natural. Entre los beneficios del almacenamiento del C en el suelo tenemos la reducción de la emisión de gases efecto invernadero como el CO₂ y CH₄ a la atmósfera, por procesos de descomposición de la materia orgánica; contribuye a la retención de agua en el suelo y mantiene su fertilidad.

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

La alta fijación de C en los páramos se debe principalmente a la formación de complejos humus-sesquióxidos que humus-arcilla.

ALCANCE

La investigación propuesta tiene como meta realizar un análisis cuantitativo de los principales factores que influyen en los mecanismos de fijación de C en el suelo de tres coberturas vegetales: pajonal, humedal y bosque montano. El estudio se enfocó principalmente en determinar la capacidad de retención de carbono por sesquióxidos (Al_2O_3 , Fe_2O_3) y arcillas amorfas; y como el tipo de cobertura de la tierra afecta a estos mecanismos.

JUSTIFICACIÓN

Los páramos son ecosistemas andinos de alta montaña, estratégicos y frágiles, ubicados en altitudes mayores a 3000 m. Estos ayudan en la regulación hídrica, son hábitats mega diversos y poseen una gran cantidad de C, el cual no se encuentra únicamente en la biomasa de los bosques, sino también en la materia orgánica presente en el suelo (FAO, 2002). Los suelos en el mundo contienen aproximadamente 1.500 Gt de C y 650 Gt de C en la vegetación (FAO, 2002).

En el Ecuador, el páramo cubre alrededor de 1'250.000 ha, es decir aproximadamente un 6% del territorio nacional (Cunalata, Inga, Álvarez, Recalde, y Echeverría, 2013). Los contenidos de C en el suelo dependen de factores como: temperatura, precipitación, humedad, cantidad de microorganismo, pH, tipo de vegetación, entre otros. En suelos de alta montaña se ha determinado que la cantidad de carbono a un metro de profundidad varían entre 4 Kg C /m³ en las zonas secas y 21 a 24 Kg C/m³ en zonas húmedas (Ayala, Villa, Mendoza y Mendoza, 2014). Otros factores que ayudan en la retención de carbono en el suelo son los sesquióxidos de Aluminio y Hierro (Al₂O₃, Fe₂O₃) que influyen en la estabilización del carbono por la formación de complejos órgano-metálicos y las arcillas como la Imogolita y Alofana que entre sus capas pueden absorber y/o adsorber grupos orgánicos (López-Ulloa, 2006). Estos mecanismos de fijación de C en el suelo pueden ser alterados, por el cambio de uso, manejo de la tierra, variación climática, entre otros.

No se han realizado muchos estudios para determinar la capacidad de retención de C orgánico en los suelos de los páramos, ni que mecanismos de fijación son los más importantes. Por consiguiente es necesario ampliar los conocimientos de los factores que influyen sobre la capacidad de almacenamiento de C en el suelo en relación a propiedades del suelo, tipo de cobertura y componentes minerales del suelo hacia la cual se orienta esta investigación.

Objetivo general

Determinar los factores que influyen en los mecanismos de fijación de carbono en suelos de alta montaña

Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar los tipos de cobertura vegetal dominantes en el páramo de Papallacta
- Determinar los principales mecanismos de fijación de carbono en suelos bajo tres diferentes coberturas vegetales.
- Establecer que factores abióticos influyen en los contenidos de carbono en el suelo.

1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 El páramo

La palabra páramo proviene del vocablo latino “parumus” la cual significa meseta desértica (Hofstede, Calles, López, Polanco, Torres, Ulloa, Vásquez y Carrera, 2014, p14). La Ley de Conservación y Uso Sustentable de la Biodiversidad, tomado de Hofstede et. al., (2003) define al paramo como: *“Ecosistema Tropical alto andino que se extiende en los Andes septentrionales, entre el actual o potencial límite superior de bosque andino cerrado y la línea de nieve perpetua, caracterizado por una vegetación dominante no arbórea, alta irradiación ultravioleta, bajas temperaturas y alta humedad”*.

El páramo es un ecosistema alpino neo tropical que cubre la región montañosa superior de los Andes de Venezuela, Colombia, Ecuador y norte del Perú. Se compone de extensas praderas, que se extienden desde la frontera forestal continua hasta el límite de la nieve (Hofstede et al, 2003). En Ecuador los páramos llegan a cubrir una extensión aproximada de 1`835.834 hectáreas sobre la cordillera occidental y oriental (Llambí, Soto, Celleri, De Bievre, Ochoa, Borja, 2002, p16).

Los páramos brindan una gran variedad de servicios ambientales entre ellos, es un regulador del almacenamiento de agua, fijación de carbono, alta biodiversidad de flora y fauna, belleza escénica, entre otros.

1.2 Principal vegetación del páramo

La vegetación que se encuentra en los páramos es considerada como única ya que solo se la puede encontrar en dichos ecosistemas (MOBOT, 2016). El páramo cuenta con la mayor diversidad de plantas de alta montaña en el mundo, con una población de 5000 especies de plantas (Llambí, et. al., 2012). En los páramos Sudamericanos existen alrededor de 4000 especies vasculares y un 60% de estas plantas son endémicas de este ecosistema.

La flora del páramo ha tenido que adaptarse a cambios extremos de temperatura y a distintas presiones evolutivas. Esto ha generado que la flora de

este ecosistema tenga cambios morfológicos como los que se indica a continuación (Mena, 2010).

- Muchas plantas tienen pelos que les ayudan a guardar el calor y a desviar los rayos ultravioletas.
- Algunas hojas son brillantes, lo que produce un efecto de espejo frente a la insolación.
- Los frailejones: Tienen especie de anticongelante químico en sus células, además sus hojas son muy grandes y tienen muchos pelos que la ayudan a soportar bajas temperaturas. Sus raíces profundas buscan el agua aprovechable
- La mayoría de plantas está cercanas al piso para evitar las heladas y conservar el calor
- Una adaptación notable es la de las almohadillas: plantas que crecen muy juntas formando un microclima interno que protege los tejidos jóvenes de las inclemencias del tiempo.

Las familias de plantas más importantes en ese ecosistema son las *Asteráceas* las cuales incluyen a los frailejones, las *Orquidáceas* y las *Poáceas*. La especie que predomina en el páramo es la paja que pertenece a *Calamagrostis intermedia*. A pesar de que los árboles son en general escasos, se pueden encontrar bosquetes como yaguales o queñoas (*Polylepis* spp.) y otras especies arbóreas como el quishuar (*Buddleja incana*).

Los géneros con la mayor diversidad de especies de plantas encontradas en los páramos son *Espeletia*, *Pentacalia*, *Diplostephium*, *Senecio*, *Calceolaria*, *Valeriana*, *Lupino* entre otros.

De acuerdo al tipo de vegetación predominante se ha clasificado el páramo en cuatro tipos principales:

1) **El súper páramo:** se localiza en las cimas de los montes. Y a pesar que a simple vista no cuenta con una gran vegetación, varias especies han

evolucionado para sobrevivir y crecer en medio de estos climas extremos. Entre estas plantas se puede mencionar a hierbas que forman almohadillas de hasta 1 m de diámetro, de color verde grisáceo pertenecientes al género *Nototriche Hartwegii* y hierbas del género *Valeriana henricii* que carecen de tallo, tienen apariencia de coliflor y miden hasta 7 cm de diámetro (MOBOT, 2016).

2) **El páramo de pajonal:** Es reconocido por presentar grandes extensiones de arbustos, pero sin duda la especie más abundante es el penacho más conocidos como pajonal del género *Calamagrostis Intermedia*, el cual cubre la mayor parte del páramo acompañado de algunas herbáceas que se encuentran esparcidas por toda el área. Entre las plantas herbáceas tenemos a las del género *Gentianella Longibarbata*, que son plantas con tallos laxos, sus flores miden hasta 40 mm de largo, tienen apariencia tubular de color verde amarillento o amarillo limón. También es muy común encontrar entre el pajonal a la flor de páramo que pertenece al género *Cichorium* (Mena, Balslev, 1986).

3) **El páramo de almohadillas:** generalmente se encuentra en los sectores más húmedos del páramo. Pueden estar formados por un solo individuo o por varios individuos de la misma o de distintas especies de almohadillas. Entre las más notorias se encuentran las almohadillas que están dentro del género *Azorellape Pedunculata*, y tapetes pertenecientes al género *Plantago Rígida* (Mena, Josse y Medina, 2001)

4) **Páramo arbustivo:** la vegetación arbustiva y arbórea se conforma de especies de arbustos con hojas gruesas y duras; un claro ejemplo son los arbustos enanos como el mortiño que pertenece al género *Pernettya Próstata* y las rosetas del género *Espelepia* (Mena, Josse y Medina, 2001 y Ramsay, 1993). Los bosques están formados principalmente por los yaguales pertenecientes al género *Polylepis*, que en el pasado ocuparon grandes extensiones de territorio alrededor de los páramos. En la actualidad solo se puede identificar pequeños remanentes con estos árboles (MOBOT, 2016).

1.3 El suelo del páramo

Los suelos de los páramos ecuatorianos se hallan sobre depósitos volcánicos. En general los suelos del páramo corresponden a Andisoles que son suelos relativamente jóvenes con una mineralogía caracterizada por la presencia de alófano. Tienen altos contenidos de carbono orgánico, son ácidos a ligeramente ácidos, poseen una alta retención de agua, baja densidad aparente, textura arenosa a franca y una saturación de bases menor a 35 cmol/100g.

La mayoría de los suelos del páramo del norte de la cordillera de los Andes recibe una precipitación entre 3000 y 5000 mm. Por este motivo su alteración es muy rápida lo que conduce a la formación de complejos aluminio-orgánicos o de minerales poco cristalizados como los alófanos e imogolita. Los contenidos de C orgánico son altos debido a las bajas temperaturas y alta humedad del suelo. Especialmente en los páramos del centro y norte del país, donde se encuentran cercanos a volcanes bastante jóvenes y que emiten ceniza volcánica riolítica.

Los tipos de suelos más comunes en los páramos del Ecuador son:

Andisoles o Andosoles (Clasificación WRB): Son suelos jóvenes de origen volcánico con un alto porcentaje de materia orgánica que pueden llegar hasta tres metros de profundidad. Se caracterizan por la presencia de alofanos la cual es una arcilla amorfa que se asocia con la materia orgánica (Soil Survey Staff, 1998, p 8). Su densidad aparente es baja menor a 0,9 g/ml, además tiene una alta porosidad con micro agregación la cual permite una estructura estable.

Histisoles: Son suelos compuestos por restos de plantas en condiciones hidromorfas. Estos suelos se forman al momento en que la materia orgánica se acumula en la superficie sin llegar a descomponerse en condiciones anaerobias, se encuentran principalmente en zonas bajas o planas del paisaje (Soil Survey Staff, 1998, p 10)

Entisoles: Son suelos formados después de la retirada del hielo los que tienen un material parental regolítico, además de que no contienen materia orgánica. Son considerados suelos muy jóvenes (Soil Survey Staff, 1998, p 9).

Inceptisoles: son suelos poco desarrollados, a pesar de que contienen un alto contenido de materia orgánica; se desarrollan en climas cálidos o fríos (Soil Survey Staff, 1998, p 10).

1.4 Tipos de andosoles

En el Ecuador se puede identificar tres tipos de andosoles, los cuales se han clasificado de acuerdo al grado de evolución.

- El andosol vítrico: estos suelos tienen una alta tasa de minerales primarios poco alterados. Tienen una edad inferior a 2.000 años. No son precisamente andosoles debido a la débil presencia de minerales poco o no cristalizados como el alofano e imogolita. En estos suelos hay el predominio de vidrio volcánico expresado por el rango de la siguiente relación $0,4\% < Al_o + 1/2 Fe_o < 2\%$. Si la relación de $Al_o + 1/2 Fe_o$ tiene valores comprendidos entre el 0,4 y 2% significa que el suelo corresponde a un andosol vitrico (Mena, Josse y Medina, 2001).

Son suelos considerados muy fértiles además de ricos en cationes, pero debido a su granulometría muy arenosa, no retienen el agua y los fertilizantes (Mena, Josse y Medina, 2001).

- El andosol alofánico (silandosol): estos andosoles tienen una predominancia de minerales paracristalinos. La cantidad de Al intercambiable es limitada y el pH es superior a 5.
- El andosol no alofánico (aluandosol): estos suelos tienen una mayor capacidad de retención de agua de hasta 200 g/100 g de suelo seco y

de carbono de más de 20 g/100 g de suelo seco que los otros andosoles.

Mientras el suelo está más evolucionado va a retener más agua y acumular más carbono y va a perder más cationes intercambiables. De acuerdo al grado de evolución, un andosol no alofánico es más evolucionado que un andosol alofánico que, a su vez, es más evolucionado que un andosol vítrico. Esta evolución se observa únicamente en los páramos (Hofstede, Segarra y Mena, 2003)

1.5 Carbono en el Ecuador

Dentro del Ecuador se han llevado a cabo varios análisis acerca del almacenamiento de C, llegando a la conclusión que existe mayor retención en el suelo como se identifica en el mapa de C (Figura 1), el cual muestra que la mayor cantidad de C se encuentra en la parte norte de la Cordillera de los Andes y sus estribaciones.

Una de las estimaciones que arrojó el mapa de C, fue que existe aproximadamente 3,6 Gt de C retenido en el suelo que sumado con el C de la biomasa, da como resultado que en todo el Ecuador hay 5,2 Gt de Carbono orgánico. (Bertzky, Ravilious, Araujo, Navas, Kapos, Carrión, Chíu, Dickson, 2011).

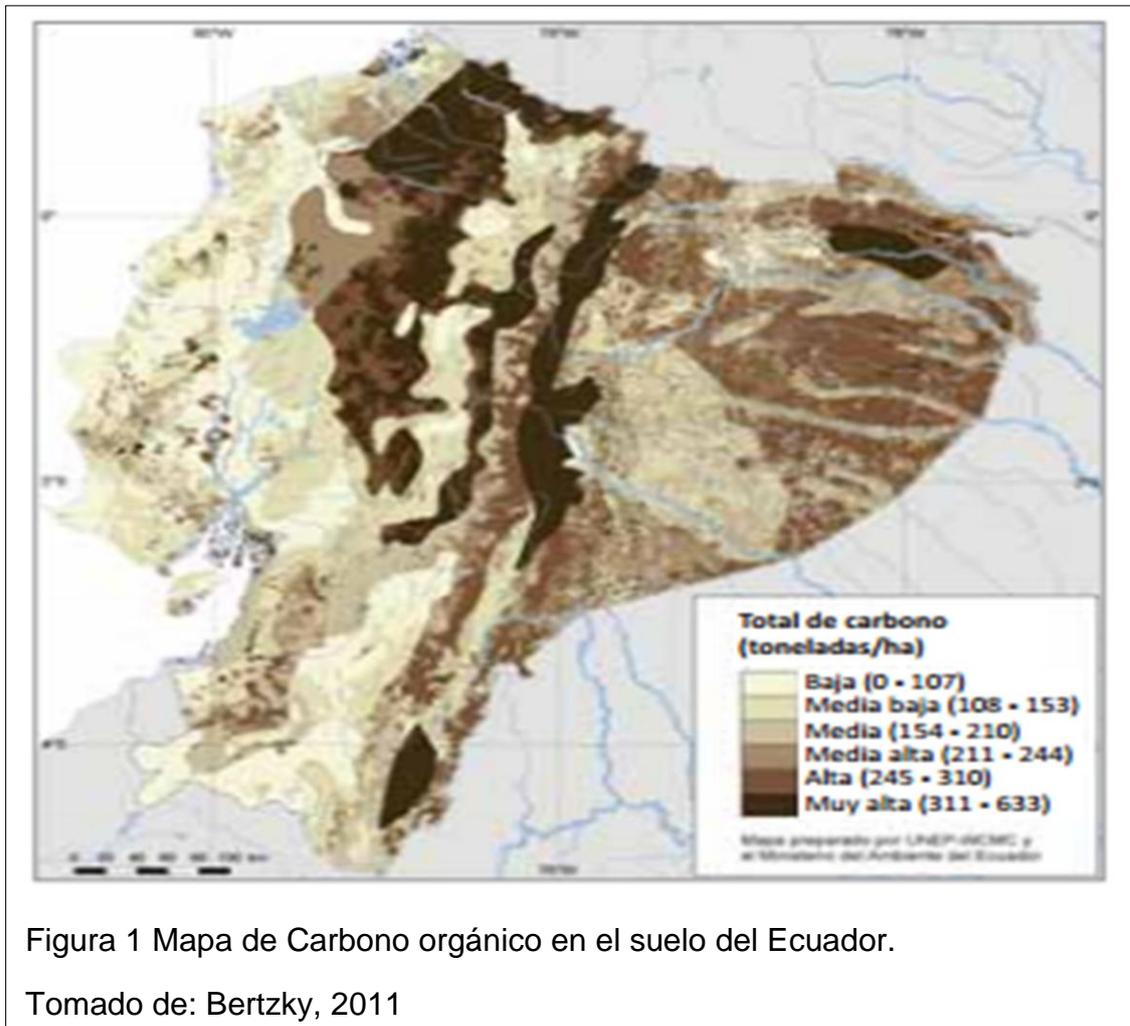


Figura 1 Mapa de Carbono orgánico en el suelo del Ecuador.

Tomado de: Bertzky, 2011

1.6 Mecanismos de fijación de carbono en los suelos

Los mecanismos de estabilización del C en el suelo se pueden dividir en los siguientes grupos:

- **RECALCITRANCIA:** son las características moleculares de las diferentes sustancias orgánicas que ayuda o retarda la degradación a través de microbios o enzimas.
- **INTERACCIONES:** son aquellas interacciones intermoleculares entre las sustancias orgánicas e inorgánicas, las cuales alteran la degradación. Dos ejemplos muy claros son :
 - SORCIÓN:** que involucran procesos de adsorción, absorción, intercambio iónico entre las partículas orgánicas con las arcillas y sesquióxidos.
 - COMPLEJACIÓN:** de los iones como Fe^3 y Al^3 con los

sustratos orgánicos es un ejemplo del aumento de la estabilidad del C orgánico en el suelo.

- **ACCESIBILIDAD:** Comprende la ubicación de las sustancias orgánicas que no permite el acceso de microbios y enzimas para su descomposición (Tomado de López-Ulloa, 2006).

Para establecer que mecanismos de fijación de carbono en el suelo son dominantes, existen algunas técnicas entre ellas tenemos:

Las extracciones realizadas con oxalato de amonio de Aluminio, Hierro y Silicio (Al_o , Fe_o y Si_o) indican los componentes activos del suelo correspondientes a minerales no cristalinos como el alofano, imogolita, óxidos amorfos, ferrihidrita así como los complejos organomineral de Al y Fe - humus (Mizota and Van Reeuwijk 1989).

El Aluminio forma en los suelos derivados de ceniza volcánica complejos estables con la materia orgánica y el mecanismo de acumulación de humus es atribuido a la interacción arcilla-humus. La formación de arcillas imogolita y alofano ocurren a pH (H_2O) mayor a 4,9 (Wada, 1985; Shoji, Fujiwara, Yamada, Saigusa, 1982).

Las extracciones realizadas con pirofosfato de aluminio y hierro (Al_p y Fe_p) indican la cantidad de estos elementos asociados con la materia orgánica o la presencia de Al y Fe en uniones de humus con minerales o llamados complejos órgano-minerales (Shoji, 1993). La formación de complejos de Al y de Fe-humus se producen a medida que disminuye el pH (H_2O) por debajo de 5.

Algunos investigadores indican que la diferencia entre Fe_o menos el Fe_p ($Fe_o - Fe_p$) es una medida del hierro inorgánico amorfo. El hierro de escasa cristalinidad es el extraído con oxalato ácido, y este estima la concentración de Ferrihidrita en el suelo (Parfitt y Childs, 1988).

La relación Al_p/Al_o es indicativa del contenido de alófono versus complejos Al-humus en suelos volcánicos. Valores cercanos a cero de Al_p/Al_o sugieren que el alofano es dominante. Valores cerca de uno de Al_p/Al_o indican el predominio de Al-húmus complejos (Mizota y van Reeuwijk 1989). Otro indicador es el Al_o

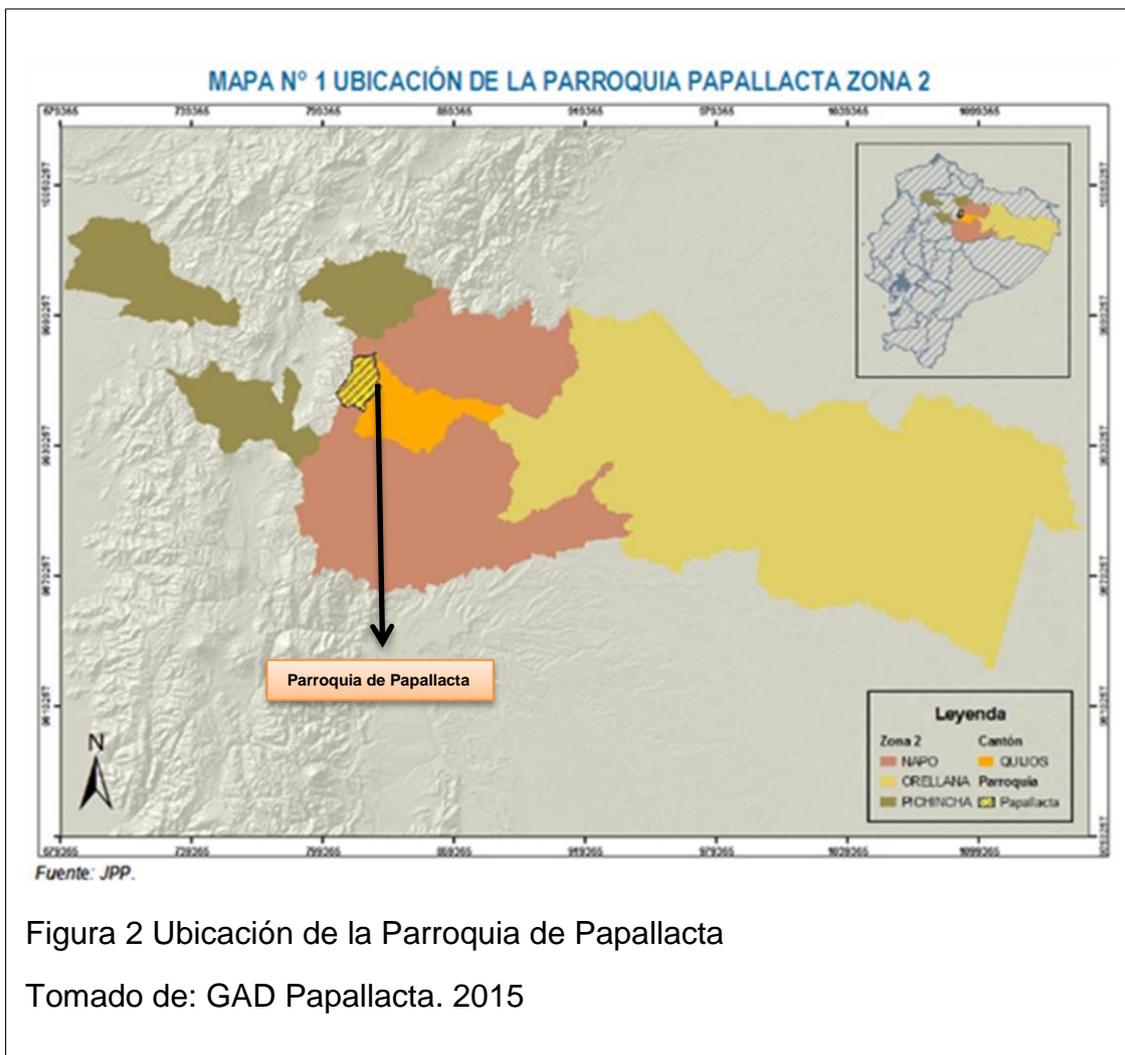
menos Al_p (Al_o-Al_p) es una indicación de contenido de minerales no cristalinos, valores altos indican mayor contenidos de estos componentes.

Percival et al., (2000) y Matus et al., (2008) sugieren que formas no cristalinas de Al, hidróxidos y complejos órgano alumínicos insolubles deben ser considerados como los parámetros clave para la estabilización del C orgánico en suelos Andicos, en lugar de alófano (o imogolita). Por otra parte, los filosilicatos de arcilla, con sus grandes superficies, son considerados, con frecuencia, como parte importante en la estabilización del C orgánico en los suelos, protegiéndola del ataque microbiano.

2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Caracterización del área de estudio

El presente estudio se realizó en la parroquia de Papallacta, que está ubicada en la cordillera de los Andes a 3.156 m, cubre una superficie de 319,6 Km², que representa la quinta parte del área del cantón Quijos de la Provincia de Napo, como se evidencia en la Figura 2.



La zona de estudio, está cerca del poblado de Papallacta como se identifica en la Figura 3.



Figura 3 Ubicación área de estudio.
Tomado de: Google Maps, 2017

2.2 Descripción del área

La parroquia de Papallacta cuenta con áreas rocosas, gravas y minas que ocupan cerca de 2,55 km², además de glaciares del volcán Antisana con una extensión de 1,82 km². Entre las coberturas vegetales de la parroquia, se tiene pastizales cultivados y naturales con 9,52 km². Solo el 25% de las familias han destinado parte sus propiedades a la producción hortícola de autoabastecimiento en pequeños huertos que en promedio ocupan 100 m² de superficie. El resto del territorio corresponde a vegetación natural. Papallacta cuenta con páramos que disponen de alta biodiversidad. Adicionalmente estos páramos almacenan y regulan el abastecimiento de

agua a las lagunas del sector, que son las que proveen de agua a la población local. La principal laguna es la de Papallacta, la cual se formó hace 300 años, aproximadamente en el año 1760, en una erupción del Antisana (FAO, 2002) y de la que se extrae agua para la ciudad de Quito.

2.3 Selección del área de estudio

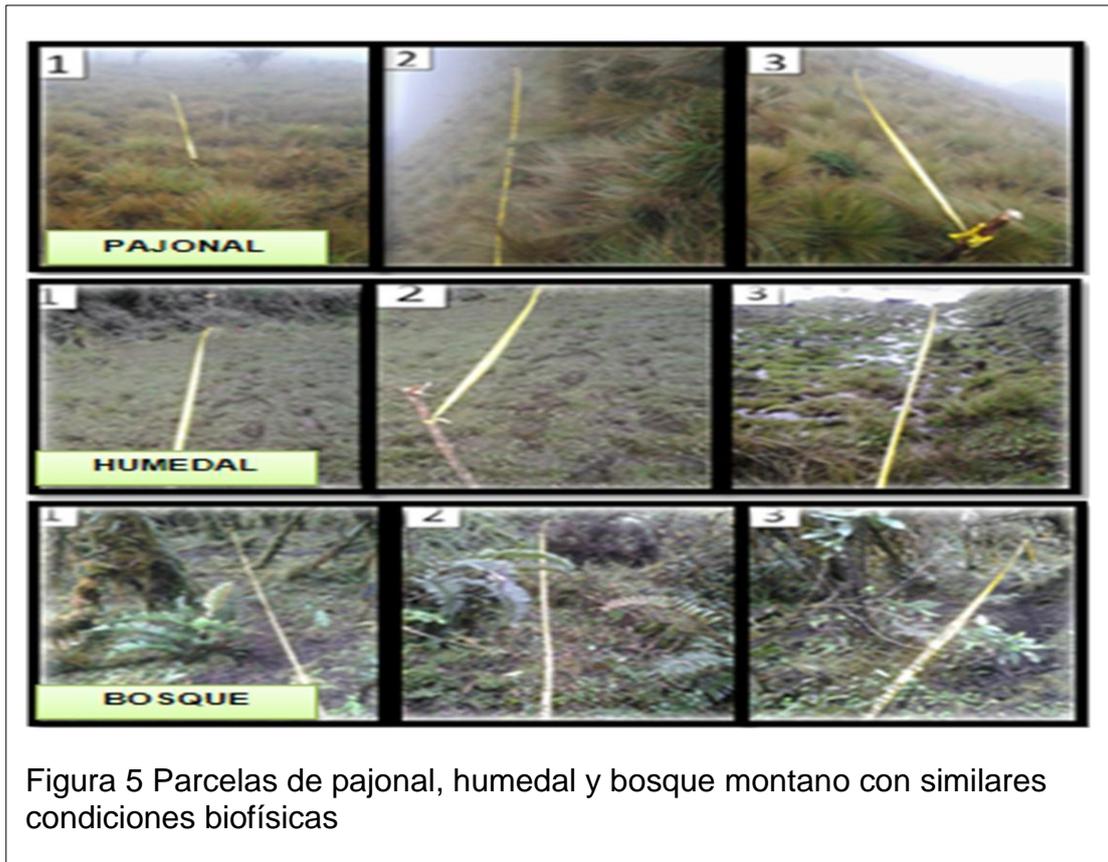
Para el estudio se escogió un área que cumpla con los siguientes requerimientos: que presente tres tipos de coberturas vegetales dominantes en el páramo (Bosque Montano, Pajonal y Humedal), que se encuentre a más de 3.000 m de altitud y que tenga poca intervención antrópica.

Al área se la dividió en zona baja y alta, en cada zona se identificó 3 sitios en los cuales se encuentren presentes los tres tipos de cobertura, que debían cumplir con similares condiciones biofísicas y edáficas entre ellas (Figura 5).

Cada cobertura debía tener una extensión de al menos 2.000 m², que denominamos parcelas. Para toda el área de estudio se tuvo 18 parcelas (6 parcelas de bosque montano, 6 de pajonal y 6 de humedal, ubicadas en los 6 sitios. La distancia entre sitios fue mínimo de 4.000 m entre ellos (Figura 4).



Figura 4 Ubicación de los sitios de estudio
Tomado de: Google Maps, 2017



2.4 Caracterización geográfica de las parcelas en estudio

En cada parcela se tomó las coordenadas geográficas X, Y en UTM y la altitud en metros utilizando un GPS. La pendiente de cada parcela se determinó con un inclinómetro (Tabla 2). Estas mediciones fueron realizadas en las 18 parcelas seleccionadas las cuales fueron codificadas de acuerdo a lo indicado en la Tabla1.

Tabla 1 Código de identificación de las parcelas

ZONA (Z)	1=ALTA	2=BAJA	
USO (U)	1=BOSQUE	2=PAJONAL	3= HUMEDAL
REPETICIÓN (R)	1= PUNTO1	2=PUNTO2	3=PUNTO3
PROFUNDIDAD (P)	1= 0-10	2=10-30	3=30-50

Tabla 2 Coordenadas, altitud y pendiente de las parcelas en estudio

CODIGO DE MUESTRA	Coordenadas (UTM)		PENDIENTE	ALTITUD
	X	Y	(°)	(m)
Z1U1R1	17M0815274	UTM9955285	16	3615
Z1U1R2	17M0815262	UTM9955265	16	3635
Z1U1R3	17M0815213	UTM9955159	14	3592
Z1U2R1	17M0815903	UTM9955375	17	3620
Z1U2R2	17M0815274	UTM9955286	22	3598
Z1U2R3	17M0815213	UTM9955212	17	3594
Z1U3R1	17M0815403	UTM9955374	6	3610
Z1U3R2	17M0815290	UTM9955341	12	3615
Z1U3R3	17M0815533	UTM9955618	12	3595
Z2U1R1	17M0815579	UTM9955278	15	3513
Z2U1R2	17M0815025	UTM9955613	12	3510
Z2U1R3	17M0814938	UTM9955284	11	3494
Z2U2R1	17M0815116	UTM9955767	6	3511
Z2U2R2	17M0815067	UTM9955659	12	3520
Z2U2R3	17M0819990	UTM9955285	11	3508
Z2U3R1	17M0815157	UTM9955798	4	3493
Z2U3R2	17M0815099	UTM9955707	5	3494
Z2U3R3	17M0814939	UTM9955350	7	3501

2.5 Caracterización de la vegetación

Para identificar la vegetación dominante se aplicó el método de líneas y puntos de intercepción, que utiliza una varilla delgada de 1 metro (Figura 6), que se coloca en forma vertical a lo largo del transecto, trazado en forma diagonal en la parcela de estudio como se muestra en la Figura 5. En cada punto que se colocó la varilla se registró el nombre, forma y tipo de plantas presentes en el transecto, de acuerdo a la propuesta de Ramsay y Oxley (1997). Los puntos que fueron establecidos corresponden a 10 y están ubicados a un metro de distancia a lo largo del transecto.

Para la determinación del porcentaje de vegetación dominante en cada parcela se estableció una parcela de 50 m², que se dividió en 4 cuadrantes y se estimó el porcentaje de vegetación dominante en cada uno, para posteriormente sumar la información de los mismos y obtener el porcentaje total de vegetación dominante por parcela.



Figura 6 Identificación de vegetación dominante en cada cobertura vegetal

2.6 Muestreo de suelo

En cada parcela utilizando un barreno se tomó 8 sub muestras al azar a diferentes distancia de un transecto de 100 m como se indica en la Figura 5. Las sub muestras de suelo fueron tomadas a tres profundidades de 0-10, 10-30 y 30-50 cm, utilizando un barreno (Figura 7). Obteniendo tres muestras compuestos por cada parcela, dando un total de 54 muestras para toda el área en estudio.



Figura 7 Toma de muestras de suelo a tres profundidades

En cada parcela las submuestras fueron homogenizadas y colocadas en fundas previamente etiquetadas con: fecha, nombre del responsable, ubicación geográfica, número de muestra y parámetros a analizar, con un peso aproximado de un kilogramo.

Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente por dos semanas debido a la excesiva humedad del suelo, previo a la realización de los análisis en el laboratorio a las muestras secas se las tamizo en una malla de 2,36 mm (Figura 8).



Figura 8 Secado al ambiente de las muestras de suelo

2.7 Análisis de laboratorio

Las metodologías empleadas para la caracterización física y química del suelo fueron:

2.7.1 Determinación de pH

Objetivo

Determinar el PH del suelo

Principio

Es medido en una escala logarítmica y lo que representa es el logaritmo negativo de la concentración de los iones de hidrógeno en el suelo.

Equipos

Potenciómetro

Balanza de precisión

Materiales

Agitador magnético

Embudos

Elermeyer 250ml

Piceta

Papel filtro

Probeta de 50/100ml

Procedimiento

Se pesa 20 gramos de suelo, y se agrega 50 ml de agua destilada, se agita por 5 minutos a 400 RPM (revoluciones por minuto), o manualmente con una varilla de vidrio durante 10 minutos. Se deja en reposo por 30 minutos y se lee en el potenciómetro. El pH se lo mide mientras se lo agita (INIAP, 1998).

2.7.2 Determinación de carbono orgánico

Objetivo

Determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo.

Principio

Se basa en un proceso de Oxidación en frío del carbón por un exceso de dicromato de potasio en un medio sulfúrico.

Equipos

Balanza analítica

Materiales

Erlenmeyer 500ml

Vasos

Pipetas

Buretas de 25ml

Probetas

Reactivos

Dicromato de potasio

Ácido orto fosfórico

Difenilamina

Ácido sulfúrico

Sulfato de hierro

Procedimiento

Se pesa 0,1g (si el suelo es muy negro es decir con altos contenidos de C) o 0,5g (cuando el suelo tiene colores claros poco carbono orgánico) de suelo por cada muestra, y se coloca en un erlenmeyer. Se agrega 5 ml de dicromato de potasio y se añade 10 ml de ácido sulfúrico, se agita suavemente durante un minuto y se deja en reposo durante 30 min.

Se agrega 100ml de agua destilada, 5ml de ácido fosfórico y 10 gotas de difenilamina. Se titula el exceso de dicromato por medio de la sal de Morh (INIAP, 1998).

Ecuación:

$$MO = \frac{(VoF - VF) \times N \times 0.335 \times 1.72 \times 1.1}{PM}$$

Vo = Volumen gastado en la titulación del blanco.

V = Volumen de la titulación de la muestra.

N = Normalidad del sulfato del hierro (0.5 normal).

0.335 = mg de peso químico equivalente de C en g.

1.72 = Constante de conversión de C a MO sobre la hipótesis de que la materia orgánica contiene 58% de C en la generalidad de suelos encontrados en el país.

1.1 = Error de conversión (10%)

PM = Cantidad de suelo pesado

F = Factor de corrección de la sal de Morh

2.7.3 Determinación de textura

Objetivo

Determinar la textura del suelo

Principio

Análisis granulométrico por densimetría con uso del hidrómetro de Bouyoucos, en donde la densidad a una profundidad determinada va disminuyendo a medida que se sedimentan las partículas.

Principio

La densidad real es la densidad de las partículas del suelo y la densidad aparente corresponde es densidad total del suelo.

Equipos y Materiales

Estufa	Papel aluminio	Agua destilada
Balanza de precisión	Probeta de 100 ml	
Anillos metálicos	Muestras de suelo	

Procedimiento

Determinación de densidad real

Para determinar la densidad real del suelo, se pesa 10 g de la muestra de suelo seca al aire, y se coloca en una probeta , a la que se añade 50 ml de agua destilada y se mide el volumen que alcanzo el suelo más el agua y por diferencia, se estima el volumen de suelo. Posteriormente se calcula la densidad real que corresponde a los 10 g de suelo dividido para el volumen del mismo.

Determinación de densidad aparente del suelo

Para determinar la densidad aparente del suelo se tomó muestras sin disturbar a las tres profundidades en estudio utilizando anillos metálicos de volumen conocido. Los anillos con el suelo se secaron en una estufa a 105°C. Utilizando una balanza de precipitación se pesó el suelo seco con el anillo y el anillo sin suelo. Usando un escalímetro se midió la altura y el diámetro del cilindro y se calculó el volumen del cilindro metálico que corresponde al volumen sin disturbar el suelo. Para determinar la densidad aparente del suelo se divide la masa del suelo seco para el volumen del cilindro.

2.7.5 Determinación de contenidos de al, fe y si extraído con oxalato ácido y pirofosfato

Objetivo

Determinar el contenido de aluminio, hierro y sílice en el suelo con dos diferentes extractantes.

Principio

La composición mineralógica de los suelos se puede determinar a partir de la cuantificación del aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido (Al_0 , Fe_0 y Si_0). Que remueve los componentes activos de Al, Fe y Si; complejos de Al- y Fe- humus y minerales no cristalinos, tales como alófana, imogolita y amorfos

o pobremente ordenados óxidos como la ferrihidrita, pero no gibsita, goetita y hematita, ni capas de silicatos (Mizota y Van Reeuwijk 1989).

Las extracciones de aluminio y hierro con pirofosfato de sodio (obteniéndose Al_p , Fe_p), indican las cantidades de Al y Fe presentes en los complejos órgano-minerales humus-metal (Shoji 1993).

Equipos

Balanza Analítica	Equipo de AAS/ o ICP	Centrifuga
Agitador Automático axial	Potenciómetro	

Reactivos

Oxalato de amonio 0,2M	Ácido clorhídrico	Solución patrón de Al
Pirofosfato de sodio 0,1M	Solución patrón de hierro	
Solución patrón de sílice	Agua destilada	

Procedimiento para determinación de Al_o , Fe_o y Si_o activos extraídos con solución ácida de oxalato de amonio.

1. Tomar 1 g de suelo
Agregar 50 ml de solución extractante de oxalato ácido 0,2 M (de pH=3)
Agitar durante 4 horas a 300 rpm y centrifugar.
2. Tomar 10 o 25 ml de solución transparente (dependerá de las especificaciones del equipo a utilizar) se agrega reactivos para estabilizar la solución previo a las lecturas.
3. Hacer la curva de calibrado tomando como punto alto la solución patrón de 25 ug/ml Fe, y como cero la solución extractante (oxalato ácido de amonio), si el equipo lo requiere realizar las mismas diluciones que el numeral 2.
4. Proceder a la medición de la concentración de Fe_o en el equipo de AAS o ICP
- 5.- Realizar el mismo procedimiento del numeral 2, 3 y 4 para la determinación de Al_o y Si_o , para esto cambiar los estándares de Fe_o por las de Al_o y Si_o en cada caso.

Nota: para Al se trabaja con llama de óxido nitroso y acetileno. Y para el Fe y el Si solo con acetileno.

Procedimiento para determinación de Al_p y Fe_p extraídos con solución pirofosfato de sodio.

- 1.- Tomar 0.5 g de suelo
Agregar 50 ml de solución extractante de pirofosfato de sodio 0.1 M

Agitar durante toda la noche a 100 rpm, centrifugar y/o filtrar

2.- Tomar 10 o 25 ml de solución transparente (dependerá de las especificaciones del equipo a utilizar).

3.- Hacer la curva de calibrado tomando como punto alto la solución patrón de 25 ug/ml Fe, y como cero la solución extractante (oxalato ácido de amonio), si el equipo lo requiere realizar las mismas diluciones que el numeral 2.

4. Proceder a la medición de la concentración de Fe_p en el equipo de AAS o ICP

5.- Realizar el mismo procedimiento del numeral 2, 3 y 4 para la determinación de Al_p , para esto cambiar los estándares de Fe_p por las de Al_p .

Nota: para Al se trabaja con llama de óxido nitroso y acetileno. Y para el Fe solo con acetileno.

2.8 Análisis estadístico

Los datos obtenidos en el laboratorio fueron sometidos a pruebas de normalidad, con el propósito de establecer si las pruebas estadísticas a realizar corresponde a pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas o realizar las transformaciones correspondientes.

Para analizar si las propiedades físicas y químicas del suelo son influenciadas por el tipo de cobertura vegetal se usó el análisis ANOVA *One Way* o de varianza, con el cual se determinó si existen o no diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los parámetros del suelo en relación a la cobertura vegetal. Finalmente se realizó la prueba de Tukey para las propiedades del suelo que resultaron significativamente diferentes entre ellas con el fin de establecer los niveles o rangos de variación entre sí.

Para establecer que mecanismo de fijación de C predomina en el área de estudio (Objetivo 2) se usó correlación de Pearson entre los contenido de carbono (C) orgánico para toda el área, con las variables independientes: pH, Arena, Arcilla, Limo, Al_o , Fe_o , Si_o , Al_p , Fe_p y las relaciones Al_p/Al_o , Al_o-Al_p , Fe_o-Fe_p y $Al_o+1/2Fe_o$.

Utilizando análisis de regresión lineal múltiple y el modelo de pasos o *stepwise selection*, se identificó que factores abióticos influyen en la retención de carbono en el suelo del área total de estudio y para los suelos estratificados por cobertura vegetal (Objetivo 3). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS.

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Identificación y caracterización de la cobertura vegetal

Para el cumplimiento del primer objetivo se realizó la identificación de la vegetación predominante en cada cobertura vegetal, trazando un cuadrante y por el método de líneas y puntos de intercepción descrito por Mostacedo, Fredericksen, (2000). Se registró la vegetación identificando las principales plantas en cada cobertura vegetal (Tabla 3).

Tabla 3 Nombres de las principales plantas dentro de cada cobertura vegetal.

TIPO DE COBERTURA VEGETAL	GÉNERO	NOMBRE COMÚN
BOSQUE	<i>Polylepis</i>	Yagual
	<i>Pernetya próstata</i>	Arbustos
	<i>Blechnum</i>	Helechos
PAJONAL	<i>Calamagrostis</i>	Pajonal
	<i>Cichorium</i>	Flor de páramo
	<i>Espelepia</i>	Rosetas
HUMEDAL	<i>Azorellape pedunculata</i>	Almohadilla
	<i>Plantago rígida</i>	Tapetes

De este análisis se tiene que para el bosque hay un predominio de yagual y arbustos, además de la presencia de helechos, tanto en la zona baja del paisaje como en el alta. En el pajonal se visualizó la presencia de rosetas, la flor de páramo y la paja característica de este sitio. En el humedal se identificó almohadillas y tapetes que cubrían casi toda expansión del sitio seleccionado. Los porcentajes de la vegetación más predominante en cada cobertura vegetal se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Porcentaje de vegetación representativa.

COBERTURA VEGETAL	VEGETACIÓN REPRESENTATIVA	GÉNERO	% VEGETACIÓN
BOSQUE	Yagual	<i>Polylepis</i>	55%
	Arbustos	<i>Pernetya Próstata</i>	20%
	Helechos	<i>Blechnum</i>	15%
	Suelo descubierto		10%
PAJONAL	Pajonal	<i>Calamagrostis</i>	80%
	Flor de Paramo	<i>Cichorium</i>	5%
	Rosetas	<i>Espelepia</i>	10%
	Suelo descubierto		5%
HUMEDAL	Almohadilla	<i>Azorellape</i>	80%
	Tapetes	<i>Pedunculata</i>	10%
	Suelo descubierto	<i>Plantago Rígida</i>	10%

Los resultados obtenidos en los cuadrantes trazados, indican que en las áreas boscosas, el yagual cubre un 55% del área, mientras que los arbustos y los helechos cubren aproximadamente el 35% del área y el suelo descubierto el 10%.

En el pajonal se identificó que el 80% del área está cubierto por paja, mientras que las rosetas y flores cubren el 15% y el restante 5% corresponde a suelo descubierto.

En los humedales, se observó un 80% de cobertura está dada por almohadillas, presencia de pequeños tapetes con un 10% y suelo descubierto con un 10%.

3.2 Determinación de los mecanismos de fijación de C en el suelo

Para establecer que mecanismos influyen en la fijación de C el suelo, se realizaron caracterizaciones físicas y químicas de las muestras compuestas de suelos provenientes de las 18 parcelas en estudio a las tres profundidades de 0 a 10; de 10 a 30 y de 30 a 50 cm (Anexo 1 y 2). Las determinaciones correspondieron a: C orgánico (%), pH, conductividad eléctrica en uS/Cm (CE), textura (porcentajes de: arena, arcilla y limo), porcentajes de aluminio, hierro y silicio extraídos con oxalato ácido (%Al_o, %Fe_o y %Si_o), porcentajes de aluminio y hierro extraído con pirofosfato (%Al_p y %Fe_p) y caracterizaciones mineralógicas con la relación del Al_p/Al_o, y los porcentajes de las relaciones de Al_o-Al_p, Fe_o-Fe_p, Al_o+1/2Fe_o.

En el Anexo 1, se observa que el pH varía de 5 a 6, valores que indican la presencia de suelos ácidos a ligeramente ácidos (pH >5,5) en el área de estudio. Los valores de CE con un rango de 37 a 253 uS/m caracterizan a este suelo como no salino. Los porcentajes de arena, arcilla y limo clasifican a los suelos como arenosos o franco arenosos. Los valores de C tuvieron un rango desde 2 a 26% rangos correspondientes a valores medios y altos.

En el Anexo 2, el hierro extraído con el oxalato (Fe_o) tuvo porcentajes en peso que fluctuaron del 0,11 al 0,85; el aluminio extraído con el oxalato (Al_o) porcentajes entre el 0,37 al 1,05; el silicio extraído con el oxalato (Si_o) con porcentajes del 0,10 a 0,56. Información que nos indica la alta variabilidad de los contenidos de arcillas amorfas y de óxidos y sesquióxidos. El Fe extraído con el pirofosfato (Fe_p) los rangos corresponden a 0,11 y 0,69%, y los rangos para Al extraído con el pirofosfato (Al_p) corresponde de 0,27 a 1%. Datos que indican la presencia de complejos metal-humus.

Para determinar que mecanismo de fijación de C predomina en el área de estudio y como estos son influenciados por el tipo de vegetación, se realizó un análisis de correlación con la prueba de *Pearson* entre el contenido de carbono (C) orgánico para toda el área, con las variables independientes: pH, Arena, Arcilla, Limo, %Al_o, %Fe_o, %Si_o, %Al_p, %Fe_p y las relaciones de: Al_p/Al_o

indicador de complejos aluminio – orgánicos (si sus valores son cercanos a uno); Al_o-Al_p indicador de alófono o imogolita a valores altos; Fe_o-Fe_p indicador de contenidos de ferrihidrita y $Al_o+1/2Fe_o$ indicador del predominio de propiedades vítricas (contenidos de vidrio volcánico: suelos jóvenes), valores superiores a 2 de esta relación indican la presencia de alófono y ferrihidrita. Correlaciones similares a la indicada se realizaron en las propiedades del suelo solo bajo bosque, bajo pajonal y bajo humedal (Anexo 4, 5 y 6).

Los resultados del análisis de correlación del C con todos los parámetros físicos y químicos se presentan en la Tabla 5. Los valores positivos indican una relación directa y los negativos inversa, entre el C y las propiedades en estudio. Los coeficientes de correlación que tienen adjunto un asterisco representan una correlación significativa al 95% ($p\text{-value} \leq 0,05$) y los de dos asteriscos una correlación altamente significativa al 99% ($p\text{-value} \leq 0,01$).

Tabla 5 Coeficientes de correlación entre el contenido de C en el área total y en las tres coberturas (Bosque, Pajonal y Humedal) y las variables pH, Arena, Arcilla, Limo, Fe_o (%), Al_o (%), Si_o (%), Fe_p (%), Al_p (%), Al_p/Al_o , Al_o-Al_p , Fe_o-Fe_p , $Al_o+1/2Fe_o$.

Coeficientes de Correlación Pearson				
	CARBONO TOTAL (%)	CARBONO BOSQUE (%)	CARBONO PAJONAL (%)	CARBONO HUMEDAL (%)
pH	0,011	0,435	0,320	-0,303
ARENA (%)	-,948**	-,960**	-,981**	-,963**
ARCILLA (%)	,433**	,496*	,744**	0,245
LIMO (%)	1,000**	1,000**	1,000**	1,000**
Fe_o (%)	-0,097	-,671**	-0,382	0,417
Al_o(%)	-0,125	0,298	-,492*	-,480*
Si_o(%)	-0,030	-0,080	0,378	-0,150
Fe_p(%)	-0,081	0,257	0,182	-0,214
Al_p(%)	-0,178	0,118	-0,359	-,683**
Al_p/Al_o	-0,152	-0,141	-0,155	-0,422
Al_o-Al_p (%)	0,116	0,138	0,191	0,175
Fe_o-Fe_p (%)	-0,039	-,660**	-0,312	0,407
$Al_o+ 1/2Fe_o$ (%)	-0,208	-0,127	-,564*	-0,186

* = significativo; ** = altamente significativo

Los contenidos de C total en el área presentan una correlación positiva altamente significativa con las propiedades físicas limo y arcilla, para toda el área de estudio y una relación inversa altamente significativa con Arena. Con el resto de propiedades y relaciones que indican la mineralogía del suelo para toda el área de estudio, el C no presenta correlaciones significativas. Los valores de correlación alta con arena, limo y arcilla indican la incidencia de la textura, en los mecanismos de fijación de C en el suelo.

Las correlaciones estratificadas realizadas por tipo de cobertura, muestran que los coeficientes de correlación negativos para el área total, entre los contenidos de C orgánico con la arena incrementaron en bosque, pajonal y humedal. Mientras que los coeficientes de correlación positiva de C con arcilla no se mantuvieron para todas las coberturas, en el humedal no presenta correlación significativa entre C y arcilla, en cambio en el pajonal esta relación se fortalece.

Al observar las correlaciones del C en el bosque, pajonal y humedal con el resto de variables se observa relaciones diferentes entre coberturas. En el bosque existe una alta correlación negativa entre el C orgánico con el Fe_o y Fe_o-Fe_p , estos coeficientes de correlación, indican el predominio de los complejos Fe-humus en los suelos bajo bosque debido a que los valores de Fe_o-Fe_p son negativos o muy cercanos a cero y la poca presencia de Fe proveniente de óxidos u/y oxihidróxidos como ferrihidrita, goetita, hematita u otros (Anexo 2). En cambio en el pajonal las correlaciones negativas altamente significativas se tiene de C con Al_o y con el $Al_o+1/2Fe_o$ y al observar el Anexo 2, y la relación % Al_o-Al_p presenta al igual que los porcentajes Fe_o-Fe_p , valores cercanos a cero o negativos, que indican un predominio de los complejos Al-humus sobre la presencia de óxidos y/u oxihidróxidos de este elemento como Gibsita y la presencia de arcillas amorfas como alofana e imogolita. Adicionalmente, se puede observar en el Anexo 2, que la relación de Al_p/Al_o en la mayoría de los suelos presenta valores cercanos a 1, que indica el predominio de los complejos Al-Humus. En el humedal los coeficientes de correlación negativa altamente significativa del C con el Al_p y la no significativa con el Fe_p ; indica que la fijación de C en los suelos bajo humedal no están

dominados por la formación de complejos humus – metal, como las tendencias encontradas en las coberturas de bosque y pajonal.

Influencia de la cobertura vegetal en la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo

Para determinar si las propiedades físicas y químicas del suelo son influenciadas por el tipo de cobertura vegetal, se realizó un análisis *ANOVA One Way*. Los promedios de los parámetros del suelo que si presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) por cobertura, fueron categorizados con la prueba de Tukey (Tabla 6).

En la Tabla 6 se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los contenidos de C, arena, limo, arcilla, para los tres tipos de cobertura en estudio. En cambio el pH del suelo presentó diferencias significativas entre las coberturas. Donde valores más altos de pH, se presenta en el humedal comparado con el bosque cambiando de una caracterización de suelo ácido en bosque a ligeramente ácido en pajonal y humedal. La conductividad eléctrica (CE) fue estadísticamente superior en el suelo del bosque y del humedal que la CE del suelo bajo pajonal.

El valor de la razón Al_p/Al_o del pajonal fue estadísticamente superior que los valores promedios de esta razón en el humedal. Pero los valores de Al_p/Al_o son cercanos a uno. Lo que indica que en los tres tipos de cobertura predominan los complejos Al-humus.

El hierro extraído con el oxalato fue superior en el humedal que en el pajonal y en el bosque, observándose que también son diferentes estadísticamente entre pajonal y bosque siendo superior en este último. Mientras que el hierro extraído con el pirofosfato indica diferencias entre humedal y pajonal siendo superior en el humedal. La relación Fe_o-Fe_p tienen los mismos rangos que los encontrados para el Fe_p , pero los valores promedios de esta relación son cercanos a cero y negativos indicando que el hierro proveniente de los complejos Fe-humus es superior al proveniente de sesquióxidos o de arcillas. Los valores promedios

del Al_o del suelo bajo bosque son diferentes estadísticamente que los encontrados en el humedal. El valor promedio del porcentaje de Al_p en pajonal es superior al del humedal en aproximadamente un 40%. La relación Al_o-Al_p presenta valores superiores en el humedal que en el pajonal donde esta relación es negativa lo que indica que hay un mayor porcentaje del Al_p en relación al Al_o , por lo tanto hay un mayor porcentaje de Al proveniente de los complejos Al-humus. La razón Al_p/Al_o es superior en el pajonal comparado con el humedal, pero los tres valores promedios de esta razón son cercanos a uno indicando la predominancia de complejos Al-humus en todas las coberturas. La relación $(Al_o+1/2 Fe_o)$ es superior en el bosque que en pajonal, indicador de la presencia de vidrio volcánico en el suelo.

Tabla 6 Valores promedios de propiedades físicas y químicas del suelo para toda el área y para las coberturas bosque, pajonal y humedal.

	BOSQUE		PAJONAL		HUMEDAL		COBERTURA TOTAL	
	PROMEDIO	DE	PROMEDIO	DE	PROMEDIO	DE	PROMEDIO	DE
pH	5,4478 b	0,24638	5,6028 ab	0,22867	5,6383 a	0,17998	5,5630	0,23153
CE (uS/m)	140,156 a	58,4597	86,250 b	43,8483	129,483 ab	44,9410	118,630	53,9831
ARENA%	74,556	6,4646	75,444	9,1730	79,722	9,8208	76,574	8,7472
ARCILLA%	4,778	2,0738	5,667	2,6789	4,444	2,3319	4,963	2,3868
LIMO%	20,667	5,1791	18,889	7,0033	16,778	11,2958	18,778	8,2363
Fe_o%	0,3540 b	0,17555	0,2280 c	0,08883	0,6031 a	0,18039	0,3951	0,21818
Al_o%	0,7411 a	0,13581	0,6824 ab	0,10342	0,5655 b	0,12371	0,6630	0,14031
Si_o%	0,3145 b	0,11767	0,4286 a	0,10652	0,3987 ab	0,09342	0,3806	0,11514
Fe_p%	0,3189 ab	0,12785	0,2833 b	0,10981	0,4336 a	0,15040	0,3453	0,14337
Al_p%	0,6333 ab	0,14646	0,7253 a	0,24915	0,4351 b	0,11333	0,5979	0,21412
Al_p/Al_o%	0,8739 ab	0,23104	1,0522 a	0,30754	0,7778 b	0,15513	0,9013	0,26144
Al_o-Al_p%	0,1078 ab	0,16887	-0,0429 b	0,20102	0,1304 a	0,10309	0,0651	0,17760
Fe_o-Fe_p%	0,0352 ab	0,22827	-0,0553 b	0,17311	0,1695 a	0,26335	0,0498	0,23930
Carbono	12,016	3,0111	10,982	4,0711	9,754	6,5667	10,917	4,7881
Al_o+1/2Fe_o%	0,9182 a	0,14483	0,7964 b	0,12018	0,8670 ab	0,11721	0,8605	0,13529

DE = desviación estándar.

Letras: significa las categorías o rangos de los parámetros del suelo determinados por la prueba de Tukey para cada tipo de cobertura en las propiedades diferentes altamente significativas por cobertura de acuerdo a análisis de ANOVA one way. Donde, a= significa primer rango (superior), ab= significa rangos comparticos, c= segundo rango y NS = no significativo con $p < 0,05$.

3.3 Determinación de los factores abióticos que influyen en la fijación de carbono en el suelo

Para establecer que factores abióticos influyen en la retención de carbono en el suelo se realizó el análisis de regresión lineal múltiple utilizando el modelo de pasos o *stepwise selection*. Modelo que se corrió con las variables: pH, CE, arena, Fe_o, Al_o, Si_o, Fe_p y Al_p. Se escogió la arena porque esta presenta una alta correlación con el C orgánico y con la arcilla y el limo. No se incluyó en este modelo las relaciones Al_p/Al_o, Al_o-Al_p, Fe_o-Fe_p y Al_o+1/2Fe_o; porque están altamente correlacionados con los elementos Fe, Al y Si extraídos con oxalato y con pirofosfato.

Tabla 7 Resumen del modelo 1 y 2 para estimación de C con variables físico y químicas del suelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,948 ^a	,898	,896	1,5454
2	,955 ^b	,912	,909	1,4466

a. Predictores: (Constante), arena

b. Predictores: (Constante), arena, Feo

Tabla 8 ANOVA de modelos de regresión

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1090,891	1	1090,891	456,751	,000 ^b
	Residuo	124,195	52	2,388		
	Total	1215,086	53			
2	Regresión	1108,355	2	554,178	264,807	,000 ^c
	Residuo	106,731	51	2,093		
	Total	1215,086	53			

a. Variable dependiente: C

b. Predictores: (Constante), arena

c. Predictores: (Constante), arena, Feo

El análisis de regresión múltiple por pasos incluyendo todas las variables mencionadas, presentó dos modelos altamente significativos (Tabla 8) los cuales explican el 90% ($R^2= 0,898$) y el 91% ($R^2= 0,912$) de la variación de C para toda el área (Tabla 7). Las ecuaciones de regresión de los dos modelos corresponden a:

Tabla 9 Ecuaciones de regresión lineal múltiple para C

Modelo	Ecuación de regresión lineal múltiple
1	$C = 50,63 - 0,519 * \text{Arena}$
2	$C = 50,72 - 0,534 * \text{Arena} + 2,7 * \text{Fe}_o$

El modelo 1 y 2 (Tabla 9) nos indica que la variabilidad del C es explicada por los porcentajes de arena del suelo y esta predicción incrementa cuando se incluye al Fe_o dentro del modelo. Estos dos modelos indican principalmente que al incrementar los contenidos de arena en el suelo los contenidos de C disminuyen. Y que los contenidos de C incrementan cuando hay un aumento de los porcentajes de Fe_o .

Para establecer si las relaciones Al_p/Al_o , Al_o-Al_p , Fe_o-Fe_p y $\text{Al}_o+1/2\text{Fe}_o$ influyen en los contenidos de C en el suelo, se realizó el análisis de regresión por *stepwise selection*, incluyendo estas variables, pH, CE, arena. Se excluyó del análisis a los elementos Fe, Al y Si extraídos con el pirofosfato y el oxalato. Los resultados de este análisis dieron los siguientes modelos.

Tabla 10 Resumen del modelo 1 y 2 para estimación de C

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,948 ^a	,898	,896	1,5454
2	,954 ^b	,909	,906	1,4692

a. Predictores: (Constante), arena

b. Predictores: (Constante), arena, Fe_o-Fe_p

Tabla 11 ANOVA de modelos de regresión

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1090,891	1	1090,891	456,751	,000 ^b

	Residuo	124,195	52	2,388		
	Total	1215,086	53			
2	Regresión	1105,005	2	552,503	255,972	,000 ^c
	Residuo	110,081	51	2,158		
	Total	1215,086	53			

a. Variable dependiente: C

b. Predictores: (Constante), arena

c. Predictores: (Constante), arena, Fe_o-Fe_p

La Tabla 10 y la Tabla 11 presentan similares resultados, que cuando se realizó el análisis con los elementos Al, Fe y Si y sin las relaciones incluidas en este análisis.

Cuando se realizó el análisis de regresión lineal múltiple para cada tipo de cobertura todas incluyeron a la arena como variable independiente que explica la variación del C en 96% para pajonal, 93% para humedal y 92% para bosque (Anexo 7).

4. CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 Cobertura vegetal

Los estudios realizados por Mobot, 2016, indica como principales plantas identificadas en los páramos de pajonal: a la flor de páramo, rosetas y paja; las cuales son también especies predominantes en el pajonal del área de estudio. De igual forma indica que las plantas encontradas en los humedales de los páramos corresponden a almohadillas y tapetes que se localizan en suelos que contienen altas cantidades de agua a nivel superficial. La vegetación arbórea en el área de estudio correspondió a arbustos, helechos y yagual; teniendo concordancia con la vegetación analizada en los páramos por Mobot (2016).

Indicando que la cobertura vegetal en el área de estudio es poco intervenida, se evidencio la presencia de helechos principalmente por la pérdida de algunos árboles principalmente por condiciones climáticas de alta precipitación y por las pendientes que favorecen deslaves, dejando claros donde crecen estas plantas.

4.2 Mecanismos de fijación de carbono

Los resultados de la Tabla 7 indican que se mantienen altas correlaciones positivas entre el C orgánico para el área total, bosque, pajonal y humedal con los parámetros % limo, % arena y % arcilla, a excepción del humedal que no presenta correlación con arcilla. Wada (1985) encontró que un mecanismo de fijación de C en el suelo puede ser atribuido a la interacción con la arcilla. Para este estudio la más alta correlación se encuentra con el limo seguida por una relación inversa con la arena.

Al estratificar el área de estudio por cobertura, las correlaciones del C orgánico con los parámetros en estudio cambiaron. Como se observa para el bosque, donde se encontró correlaciones de $R^2 = -0,67$, $p < 0,001$ entre el C y el Fe_o y para el C y $\%Fe_o-Fe_p$ valores de $R^2 = -0,67$, $p < 0,001$. Los valores de

% ($Fe_o - Fe_p$) (Anexo 2) son cercanos a cero o negativos, indicando que predominan los complejos Fe-humus, determinados por la extracción del Fe con el pirofosfato de sodio, que indica el Fe provenientes de los complejos humus-Fe (Shoji y Fujiwara, 1984). Adicionalmente, los valores de la relación de $Al_o + 1/2Fe_o$ no muestran valores superiores a 2, indicador de la presencia de alofana y ferrihidrita (Shoji, et. al. 1982), por lo tanto los mecanismos de fijación no se deben a estos materiales amorfos. Macias, Calvo de Anta, Rodrigo Lado, Verde, Pena y Camps, (2004) indica que los mecanismos de fijación de C en suelos andosoles vitricos, están dominados por la formación de complejos metal-humus.

Otro parámetro que influye en los contenidos de C orgánico en el suelo es el pH. Los suelos andosoles vitricos son suelos de carga variable, por lo tanto el pH tiene un rol muy importante en la carga y en los procesos de formación de complejos humus-metal. Para el caso del bosque el mecanismo que está influenciando, en la fijación de C en el suelo es la formación de complejos Fe-humus, debido a pH inferiores a 5,5. Resultados similares fueron encontrados por Alcalá, et.al., en el año 2009, que indican que a pH bajos menores a 5 y altos contenidos de materia orgánica la formación de complejos Fe-humus y Al-humus es favorecida. En los suelos bajo bosque los valores de pH corresponden a 5 por lo tanto son ácidos y los contenidos de C orgánico en promedio corresponden a valores altos, adicionalmente los bajos valores de la relación $Fe_o - Fe_p$ indican el predominio de complejos Fe-humus en suelos bajo bosque similar a lo encontrado por Alcalá, et al. (2009).

En el C orgánico del pajonal se evidencia una alta correlación negativa del C con Al_o y los porcentajes de $(Al_o + 1/2Fe_o)$. Del Anexo 2, se determina que de acuerdo a los valores de la relación de $(Al_o + 1/2Fe_o)$, inferiores a 2, en toda el área predomina el vidrio volcánico, material mineral que tiene una alteración rápida y que da origen a complejos metal-humus (Shoji, et. al., 1982). La alta correlación negativa del C con el Al_o y la relación de $Al_o + 1/2Fe_o$ indica que la presencia de vidrio volcánico en suelos bajo pajonal disminuye la fijación de C. La alta correlación del C con la arcilla $R^2 = 0,74$, $p < 0,000$, indica que el

principal mecanismo de fijación de C en el suelo bajo pajonal corresponde a por la formación de complejos de arcilla-humus. Pero por la falta de análisis mineralógicos a detalle por métodos de difracción de rayos X, espectrometría de infrarrojo y microscopia electrónica de transición, para caracterizar los minerales amorfos y las arcillas silicatadas cristalinas, no permite establecer con claridad los mecanismos de fijación de C con minerales cristalinos o amorfos presentes en la fracción arcilla, limo y arena.

En el suelo bajo humedal el C orgánico del suelo mantiene correlaciones inversas altamente significativas con los contenidos de Al_o y el Al_p . También se observa una relación inversa no significativa con el Fe_p , lo que indica que bajo esta cobertura la formación de complejos humus-metal, no es relevante. Además, en esta cobertura la correlación del C con arcilla es no significativa, excluyéndose también este mecanismo de fijación que puede ser por adsorción electrostática o por capilaridad. Al presentar estos suelos hidromorfismo permanente, las condiciones de reducción disminuyen los procesos de descomposición del C orgánico, lo que favorece el almacenamiento del C en el suelo, por lo tanto este puede ser el principal mecanismo de retención de C orgánico en el suelo bajo humedal.

4.3 Factores abióticos que influyen en la pérdida de carbono

Del análisis de regresión lineal múltiple por *Stepwise Selection*, se obtiene que el principal parámetro que influye en la variabilidad de C orgánico, corresponde a la arena, tanto para toda el área de estudio como para el C orgánico del suelo bajo bosque, humedal y pajonal. La mayoría de estudios de fijación de C en el suelo de paramo y específicamente en andosoles indican que los componentes amorfos de Al y las arcillas son principalmente las responsables por la formación de complejos metal-humus-arcilla y la estabilización de agregados del suelos (Huyens, Boeckx, Cleemput, Oyarzún y Godoy, 2005). Pero la determinación de textura en Andosoles es problemática especialmente para las arcillas, porque los altos contenidos de materia

orgánica en el suelo dificultan la dispersión de la misma (Mizota y van Reeuwijk, 1989). Los resultados de la regresión lineal múltiple deben ser considerados con cuidado, porque no se incluyó al limo en este análisis por la correlación de 1 entre el C y el % limo y por los bajos porcentajes de arena determinados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La cobertura vegetal en el páramo de Papallacta para remanentes boscosos está conformada y dominada por Yagual 55%, arbustos 20% y helechos 15%, para humedal predominan las almohadillas 80% y tapetes 10% y en el pajonal se tienen pajonal 80%, flor de paramo 5% y rosetas 10%, resultados que son equiparables con otros estudios y que nos lleva a concluir que la zona de estudio se mantiene la vegetación característica, casi inalterable en cada cobertura.

Los mecanismos de fijación de C en la zona de estudio presentaron patrones diferentes por tipo de cobertura, dominando la formación de complejos humus-Fe en el bosque, favorecida por pH ácidos; en el pajonal los mecanismos de estabilización corresponden a la formación de complejos-arcilla, que es explicada por la alta correlación del C con la arcilla; mientras que en el humedal la fijación de C está gobernada principalmente las condiciones de reducción por el hidromorfismo que favorece la permanencia del C en el suelo.

Los porcentajes de carbono orgánico en el suelo, difieren entre coberturas, donde el bosque presenta más del 2% del C en relación al pajonal y humedal, diferencias que pueden ser explicadas por el pH de la solución del suelo que tuvo diferencias significativas entre coberturas. Donde a pH bajo predominan los complejos metal-humus. Adicionalmente al corresponder estos suelos a Andosol vítrico, suelo de carga variable, la variación de pH modifica los mecanismos de fijación de C.

Para toda el área de estudio la relación Al_p/Al_o es cercana a 1 indicador que corresponde a la formación de complejos Al-humus que predominan frente a la formación de complejos alofana-humus, por lo que se concluye que los mecanismos de fijación de C en toda el área está dominada por la formación de estos quelatos y que esta relación es superior en suelos bajo pajonal con pH ligeramente ácidos.

Los contenidos de C en el suelo en estudio fueron explicados en un 90% por la relación inversa del C con la arena, pero esta dependencia del C con la textura del suelo, debe ser considerada con cuidado, por el problema de la dispersión de las arcillas en la determinación de estas partículas en los Andisoles que son suelos con altos contenidos de materia orgánica.

5.2 Recomendaciones

Es necesario realizar estudios más detallados de los mecanismos de fijación en el suelo, que incluyan determinaciones de Fe, Al y carbono, con extractante diatomita y/o determinaciones mineralógicas del suelo, usando Difracción de Rayos X, debido a que los resultados en este estudio nos indican una alta incidencia de la mineralogía del suelo en la estabilización del carbono que no puede ser claramente discernida utilizando las mediciones de aluminio, hierro y sílice con los extractantes oxalato y pirofosfato.

En estudios posteriores se debe incluir no el factor mineralogía del suelo, en los estudios de fijación de C en el suelo, sino factores como el paisaje y sobre todo estudios de las características moleculares de la vegetación para determinar cómo esta incide en la resistencia a la descomposición por parte de los microorganismos.

Igualmente se deben replicar este tipo de estudios en áreas con mayor intervención, donde ya se ha evidenciado pérdidas de carbono por el cambio de uso y manejo de la tierra, y determinar qué factores afectan a los procesos de edafogénesis y su relación con la estabilización de carbono en el suelo.

REFERENCIA

Actualización Plan de desarrollo y ordenamiento territorial gobierno autónomo Descentralizado Parroquial de Papallacta (GADP). (2015). Recuperado el 25 de Octubre del 2016 de: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1560508650001_Diagn%C3%B3stico%20PDYOT%20Papallacta_16-10-2015_19-29-46.pdf

Aguirre, N., Torres, J. y Velasco, P. (2013). *Guía para la restauración ecológica en los páramos del Antisana*. Recuperado el 08 de Abril del 2016 de: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Gu%C3%ADa-Metodol%C3%B3gica-restauracion-p%C3%A1ramos.pdf>

Alcalá, d J., Hidalgo –Moreno, M., Gutiérrez- Castorena, M.C (2009). *Mineralogía y Retención de Fósforos en Andisoles*. Terra Latinoamericana, Chapingo México. Vol. 27, núm. 4, pp. 275-286.

Ayala, L., Villa, M., Mendoza, Z y Mendoza N. (2014). *Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri, provincia de Loja y Zamora Chinchipe*. Recuperado el 16 de Abril del 2016 de: http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-12-1/art_5.pdf

Bertzky, M., Ravilious, C., Araujo Navas, A.L., Kapos, V., Carrión, D., Chiu, M., Dickson, B. (2011) *Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: Explorando los beneficios múltiples*. Recuperado el 20 de Octubre del 2016 de: <http://www.unepwcmc.org/climate%20www.carbon%C2%ADbiodiversity.net>

Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., (2005). *The impact of land use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in the south Ecuadorian páramo* . Hydrological Processes 19, 3985-3007.

- Boutaert, W., Deckers, J., Wyseure, G., (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* 70 (2007) 143 – 154.
- Calles, J. (2014). *Ganadería, páramos, agua y cambio climático*. Recuperado el 10 de Febrero del 2016 de: <http://www.agua-ecuador.blogspot.com/2014/08/ganaderia-paramos-agua-y-cambio.html>
- Cano, A. (2000). *Manual de Prácticas de la Materia de Edafología*. Recuperado el 18 de Octubre del 2016 de: <http://www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf>
- Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDENSAN). (2009). *Por un manejo sostenible de los Páramos*. Recuperado el 11 de Octubre del 2016 de: http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/Por_un_manejo_sostenible_de_los_p_amos.pdf
- Cunalata, C., Inga, C., Alvarez, G., Recalde, C y Echeverría, M. (2013). *Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades de Chimborazo y shobol llinllin en Ecuador*. Recuperado el 08 de Octubre del 2016 de: <file:///C:/Documents%20and%20Settings/Administrador/Mis%20documentos/Downloads/Dialnet-DeterminacionDeCarbonoOrganicoTotalPresenteEnEISue-4227496.pdf>
- Ecological Society of America. (2000). *Carbon sequestration in Soils*. Recuperado el 30 de Agosto del 2016 de: <https://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2012/12/carbonsequestrationinsoils.pdf>
- FAO. (2002). *Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra*. Recuperado el 14 de Febrero del 2016 de: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2779S/y2779s00.pdf>
- Galarza, N. (2014). *Ecoturismo en la Parroquia de Papallacta, Cantón Quijos, Provincia de Napo, Estrategias de Sostenibilidad para su consolidación*.

Recuperado el 25 de Febrero del 2016 de:
file:///E:/REFERENC.%20TESIS/datos%20de%20papallacta.pdf

GREENPEACE. (2013). *Páramos en peligro*. Recuperado el 02 de Febrero del 2016
de:<http://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/images/2013/paramos/12/Informe%20P%C3%A1ramos%20en%20peligro.pdf>

Hofstede R., Calles J., López V., Polanco R., Torres F., Ulloa J., Vásquez A y Carrera M. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN. Quito, Ecuador.

Hofstede, R. y Mena, P. (2008). *Los beneficios escondidos del páramo*. Recuperado el 10 de Marzo del 2016 de: <http://www.condesan.org/e-foros/paramos2/losbeneficiosescondidosdelpa.htm>

Hofstede, R., Segarra, P y Mena, P. (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Global Peatland initiative/NC.IUCN/EcoCiencia. Quito.

Houghton, R. (1995). *Global Change Biology*. Recuperado el 04 de Marzo del 2016 de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00026.x/abstract>

Huyens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., y Godoy, R (2005). Aggregate and soil organic carbón dynamics in South Chilean Andisols. *Biogeosciences*, 2, 159- 174, 2005

INIAP. (1998). *Metodología de laboratorio de suelos de la Estación Experimental Santa Catalina*. Quito. Ecuador.

Llambí D., Soto A., Celleri L., De Bievre B., Ochoa B., Borja P. (2002). *Ecología, hidrología y suelo de páramos*. Proyecto Andino. Quito, Ecuador.

- López, M. (2006). *Soil ecosystem services in different land use types in coastal Ecuador*. Recuperado el 04 de Marzo del 2016 de: <http://d-nb.info/982223641/34>
- Macias, F., Calvo de Anta, R., Rodrigo Lado, L., Verde, R., Pena, X., Camps, M. (2004). El Sumidero de Carbono de los suelos de Galicia. *Edafología*, Vol. 11(3), pp 341- 376.
- MBG,(1995). "To discover and share knowledge about plants and their environment, in order to preserve and enrich life." Recuperado el 15 de Septiembre del 2016 de: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/>
- Mena, P. (2010). *Los Páramos Ecuatorianos: Paisajes diversos, frágiles y estratégicos*. Recuperado el 20 de Febrero del 2016 de: <http://www.afese.com/img/revistas/revista54/paramos.pdf>
- Mena, P., Balslev H. (1986). *Comparación entre los páramos y el cinturón afroalpino*. AAU Reports 12. Quito, Ecuador.
- Mena, P., Josse, C. y Medina, G. (2001). *En Los Suelos del Páramo*. Serie Páramo 5. GTP/ Abya Yala. Quito.
- Mizota, C., and Reeuwijk, L.P. (1989): *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions*. Recuperado el 11 de Octubre del 2016 de: http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/ISM_SM2.pdf
- MOBOT, (2016). *Flora y Vegetación*. Recuperado el 22 de Febrero del 2016:http://www.mobot.org/MOBOT/research/paramo/flora_vege.shtml
- Mostacedo, B., Fredericksen, T. (2000). *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. Recuperado el 13 de Octubre del 2016 de: <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Parfitt, R., Childs, c. (1988). Estimation of forms of Fe and Al:A review, and analysis of contrasting soils by dissolution and Moessbauer methods. *Aust. J. Soil Res.* 26:121-144.

- Podwojewski, P. y Poulenard, J. (2000). *Los suelos de los páramos en el Ecuador*. En: Los suelos de páramo. Serie Páramo 5 GTP. Editorial Abya Yala. Quito.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., Hofstede, R., (2002). *Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza* (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management* 18, 45-55.
- Ramsay P. (1993). *The paramo vegetation of Ecuador: the community ecology. Dynamics and productivity of tropical grasslands in the Andes*. Tesis de Ph.D. Universidad de Gales. Reino Unido
- Ramsay, P., Oxley, E. (1997). *The growth form composition of plant communities in the Ecuadorian páramos*. *Plant Ecology* 131: 173- 192 Quito, Ecuador.
- Shoji, S., Fujiwara, Y., Yamada I., Saigusa, M. (1982). *Chemistry and clay mineralogy of ando soils, brown forest soils, and podzolic soils formed from recent tephra ashes, North- Eastern Japan*. *Soil Sci.* 133(2):69-72.
- Shoji, S. and Y. Fujiwara. 1984. *Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from Northeastern Japan: Their forms, properties, and significance in clay weathering*. *Soil Sci.* 37: 216-226.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. (1993): *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization*. *Developments in Soil Science*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Shoji, S.; T. Kurebayashi e I. Yamada.(1990). *Growth and chemical composition of japanese pampas grass (Miscanthus sinensis) with special reference to the formation of dark-colored Andisols innortheastern Japan*.*Soil Sci. Plant Nutr.* 36:105-120.

- Soil Survey Staff (1998). *Keys to Soil Taxonomy*. USDA. Estados Unidos
- Thompson, L. y Thoeh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverte S.A
- Suárez, L. (2000). *Los Páramos como paisajes culturales en el Ecuador*. Recuperado el 12 de Febrero del 2016 de: <http://www.condesan.org/unesco/Cap%2012%20Ecuador%20Luis%20Suarez.pdf>
- Thompson, L y Troefh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Recuperado el 18 de Febrero del 2016 de: http://www.academia.edu/7716432/DENSIDAD_REAL_APARENTE_Y_POROSIDAD_DEL_SUELO
- Vásquez, C. y Orozco, A. (2010). *La destrucción de la naturaleza*. Recuperado el el 02 de Marzo del 2016 de: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/083/htm/destrucc.htm>
- Vizcaino, C. (2015). *Comparación de los contenidos de carbono entre la Amazonía y los páramos del Ecuador*. Recuperado el 08 de Abril del 2016 de: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8737/Granja,%20OC.%20-%20Comparaci%C3%B3n%20de%20los%20contenidos%20de%20carbono%20entre%20la%20Amazon%C3%ADa%20y%20los%20p%C3%A1ramos%20del%20Ecuador.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wada, K. (1985). The distinctive properties of andosols *Advances in Soil Science* 2, 174-223.
- Wada, K. (1985). Distinctive properties of Andosols. In: *Adv. Soil Sci*. Springer Verlag. New York Inc. 175 – 229.

ANEXOS

Anexo 1: Caracterización físico-química de los suelos

CODIGO DE MUESTRA	PENDIENTE (°)	ALTURA (m)	pH	CE (µS/cm)	ARENA %	ARCILLA %	LIMO %	CARBONO %	DENSIDAD APARENTE (g/ml)	DENSIDAD REAL (g/ml)
Z1U1R1P1	16	3615	5	253,3	90	2	8	4,65	1,0	2,3
Z1U1R1P2	16	3615	5,3	192,9	80	4	16	9,30	1,0	3,3
Z1U1R1P3	16	3615	5,6	81,3	70	6	24	13,95	0,9	1,7
Z1U1R2P1	16	3635	5,1	180	82	2	16	9,30	1,1	3,5
Z1U1R2P2	16	3635	5,2	171,6	64	6	30	17,44	1,0	2,5
Z1U1R2P3	16	3635	5,6	75,4	76	4	20	11,63	0,9	2,8
Z1U1R3P1	14	3592	5,5	179,9	80	2	18	10,47	1,1	3,1
Z1U1R3P2	14	3592	5,61	143,3	74	4	22	12,79	1,0	2,5
Z1U1R3P3	14	3592	5,78	68,9	64	8	28	16,28	0,9	1,3
Z2U1R1P1	15	3513	5,09	197,6	72	6	22	12,79	1,6	2,5
Z2U1R1P2	15	3513	5,4	120,5	68	8	24	13,95	1,1	3,1
Z2U1R1P3	15	3513	5,68	94,9	70	8	22	12,79	1,0	2,1
Z2U1R2P1	12	3510	5,3	210,8	76	4	20	11,63	1,4	1,6
Z2U1R2P2	12	3510	5,6	104,9	74	6	20	11,63	1,2	2,5
Z2U1R2P3	12	3510	5,8	70,3	72	2	26	15,12	1,1	3,3
Z2U1R3P1	11	3494	5,3	197,9	74	4	22	12,79	1,2	2,1
Z2U1R3P2	11	3494	5,5	102,5	80	6	14	8,14	1,3	2,0
Z2U1R3P3	11	3494	5,7	76,8	76	4	20	11,63	1,0	1,0
Z1U2R1P1	17	3620	5,3	165,9	86	4	10	5,81	1,2	3,6
Z1U2R1P2	17	3620	5,7	62,3	72	6	22	12,79	1,0	2,7
Z1U2R1P3	17	3620	6,01	40	80	2	18	10,47	1,0	1,1
Z1U2R2P1	22	3598	5,3	121,4	78	4	18	10,47	1,3	3,2
Z1U2R2P2	22	3598	5,6	73,8	76	4	20	11,63	1,0	2,6
Z1U2R2P3	22	3598	5,9	46,3	78	2	20	11,63	1,0	2,5
Z1U2R3P1	17	3594	5,5	121,2	88	4	8	4,65	1,4	2,3
Z1U2R3P2	17	3594	5,4	52,1	78	6	16	9,30	1,2	2,5
Z1U2R3P3	17	3594	5,8	37,1	78	6	16	9,30	1,0	1,7
Z2U2R1P1	6	3511	5,28	178,9	84	4	12	6,98	1,5	3,6
Z2U2R1P2	6	3511	5,6	79,3	58	10	32	18,60	1,3	3,3
Z2U2R1P3	6	3511	5,74	48,9	72	6	22	12,79	1,0	1,5
Z2U2R2P1	12	3520	5,3	120,4	76	6	18	10,47	1,1	1,1
Z2U2R2P2	12	3520	5,5	69,7	60	10	30	17,44	1,0	2,5
Z2U2R2P3	12	3520	5,7	59,2	72	6	22	12,79	0,8	2,0
Z2U2R3P1	11	3508	5,55	140,5	88	4	8	4,65	1,0	3,5
Z2U2R3P2	11	3508	5,78	65,3	58	12	30	17,44	1,0	2,3
Z2U2R3P3	11	3508	5,89	70,2	76	6	18	10,47	0,9	2,0
Z1U3R1P1	6	3610	5,3	231,5	80	0	20	11,63	1,3	2,1
Z1U3R1P2	6	3610	5,7	104,5	88	4	8	4,65	1,1	1,7
Z1U3R1P3	6	3610	5,98	86	88	8	4	2,33	1,0	1,6
Z1U3R2P1	12	3615	5,5	183,4	84	2	14	8,14	1,1	2,9
Z1U3R2P2	12	3615	5,7	112,2	86	2	12	6,98	0,9	3,0
Z1U3R2P3	12	3615	5,9	92,1	86	2	12	6,98	0,8	1,9
Z1U3R3P1	12	3595	5,5	152,5	86	4	10	5,81	1,1	3,9
Z1U3R3P2	12	3595	5,78	109,1	84	4	12	6,98	1,0	2,6
Z1U3R3P3	12	3595	5,85	97,7	86	6	8	4,65	0,9	1,2
Z2U3R1P1	4	3493	5,51	186,3	74	4	22	12,79	1,4	3,2
Z2U3R1P2	4	3493	5,55	135,7	66	4	30	17,44	0,8	2,6
Z2U3R1P3	4	3493	5,65	90,3	88	4	8	4,65	0,7	1,6
Z2U3R2P1	5	3494	5,55	190,6	66	4	30	17,44	1,9	3,3
Z2U3R2P2	5	3494	5,61	108	58	6	36	20,93	1,6	2,5
Z2U3R2P3	5	3494	5,71	98,1	63	10	44	25,58	1,6	1,1
Z2U3R3P1	7	3501	5,5	155,8	86	6	8	4,65	1,0	3,8
Z2U3R3P2	7	3501	5,4	132	80	4	16	9,30	1,1	2,4
Z2U3R3P3	7	3501	5,8	64,9	86	6	8	4,65	0,9	1,1

Anexo 2 Caracterización química y mineralógica de los suelos.

CODIGO DE MUESTRA	Feo %	AlO %	SiO %	Fep %	Alp %	Alp/AlO %	AlO-Alp %	Feo-Fep %	Alox+1/2 Feox %
Z1U1R1P1	0,77	0,54	0,34	0,16	0,54	1,01	-0,003	0,611	0,92
Z1U1R1P2	0,63	0,61	0,44	0,41	0,86	1,42	-0,255	0,222	0,92
Z1U1R1P3	0,37	0,64	0,52	0,62	0,77	1,21	-0,131	-0,253	0,82
Z1U1R2P1	0,39	0,96	0,10	0,40	0,76	0,80	0,196	-0,012	1,15
Z1U1R2P2	0,24	1,05	0,16	0,26	0,91	0,87	0,141	-0,021	1,17
Z1U1R2P3	0,22	0,73	0,28	0,30	0,86	1,19	-0,137	-0,083	0,83
Z1U1R3P1	0,50	0,87	0,18	0,34	0,66	0,75	0,219	0,162	1,13
Z1U1R3P2	0,49	0,65	0,20	0,42	0,68	1,04	-0,028	0,071	0,90
Z1U1R3P3	0,13	0,65	0,32	0,49	0,62	0,95	0,031	-0,361	0,71
Z2U1R1P1	0,40	0,75	0,23	0,14	0,53	0,70	0,227	0,261	0,96
Z2U1R1P2	0,24	0,82	0,35	0,29	0,58	0,71	0,236	-0,059	0,93
Z2U1R1P3	0,31	0,58	0,46	0,35	0,56	0,95	0,029	-0,040	0,74
Z2U1R2P1	0,17	0,59	0,26	0,16	0,44	0,74	0,152	0,013	0,68
Z2U1R2P2	0,23	0,82	0,27	0,20	0,56	0,68	0,258	0,032	0,94
Z2U1R2P3	0,30	0,78	0,29	0,35	0,53	0,68	0,253	-0,046	0,93
Z2U1R3P1	0,43	0,79	0,40	0,15	0,40	0,50	0,394	0,275	1,00
Z2U1R3P2	0,45	0,80	0,41	0,31	0,58	0,72	0,224	0,144	1,03
Z2U1R3P3	0,10	0,71	0,47	0,39	0,58	0,81	0,135	-0,284	0,77
Z1U2R1P1	0,31	0,85	0,36	0,24	1,00	1,18	-0,155	0,067	1,00
Z1U2R1P2	0,19	0,65	0,46	0,32	1,00	1,54	-0,352	-0,135	0,74
Z1U2R1P3	0,14	0,68	0,47	0,37	0,95	1,39	-0,266	-0,237	0,75
Z1U2R2P1	0,26	0,81	0,16	0,37	0,89	1,10	-0,084	-0,105	0,94
Z1U2R2P2	0,18	0,76	0,32	0,36	0,98	1,28	-0,212	-0,183	0,85
Z1U2R2P3	0,38	0,75	0,34	0,41	0,91	1,22	-0,165	-0,034	0,94
Z1U2R3P1	0,28	0,87	0,29	0,18	1,00	1,14	-0,125	0,098	1,01
Z1U2R3P2	0,20	0,65	0,36	0,28	0,96	1,48	-0,310	-0,071	0,75
Z1U2R3P3	0,13	0,77	0,40	0,40	0,86	1,12	-0,094	-0,271	0,83
Z2U2R1P1	0,34	0,66	0,41	0,11	0,46	0,70	0,195	0,230	0,83
Z2U2R1P2	0,19	0,60	0,48	0,13	0,59	0,99	0,005	0,064	0,70
Z2U2R1P3	0,09	0,60	0,52	0,41	0,42	0,70	0,180	-0,325	0,65
Z2U2R2P1	0,36	0,56	0,45	0,15	0,46	0,83	0,093	0,208	0,74
Z2U2R2P2	0,28	0,68	0,51	0,20	0,51	0,74	0,176	0,076	0,82
Z2U2R2P3	0,11	0,61	0,55	0,26	0,28	0,46	0,328	-0,152	0,66
Z2U2R3P1	0,32	0,58	0,53	0,14	0,69	1,19	-0,111	0,183	0,74
Z2U2R3P2	0,17	0,49	0,54	0,36	0,61	1,23	-0,116	-0,183	0,58
Z2U2R3P3	0,18	0,70	0,56	0,41	0,46	0,65	0,242	-0,226	0,79
Z1U3R1P1	0,85	0,46	0,35	0,11	0,42	0,91	0,040	0,743	0,88
Z1U3R1P2	0,49	0,64	0,39	0,33	0,65	1,01	-0,006	0,158	0,88
Z1U3R1P3	0,23	0,71	0,45	0,51	0,40	0,56	0,312	-0,283	0,83
Z1U3R2P1	0,54	0,65	0,54	0,43	0,55	0,85	0,101	0,114	0,92
Z1U3R2P2	0,57	0,76	0,55	0,47	0,64	0,84	0,126	0,098	1,05
Z1U3R2P3	0,31	0,70	0,56	0,22	0,53	0,75	0,177	0,095	0,86
Z1U3R3P1	0,70	0,75	0,41	0,36	0,39	0,52	0,357	0,338	1,10
Z1U3R3P2	0,83	0,57	0,43	0,38	0,40	0,70	0,169	0,445	0,98
Z1U3R3P3	0,83	0,63	0,46	0,46	0,53	0,83	0,108	0,368	1,05
Z2U3R1P1	0,77	0,37	0,22	0,44	0,33	0,91	0,033	0,335	0,76
Z2U3R1P2	0,74	0,54	0,27	0,63	0,36	0,67	0,179	0,104	0,91
Z2U3R1P3	0,43	0,52	0,32	0,66	0,45	0,87	0,067	-0,230	0,74
Z2U3R2P1	0,77	0,32	0,37	0,31	0,25	0,77	0,073	0,469	0,71
Z2U3R2P2	0,61	0,51	0,42	0,32	0,27	0,53	0,236	0,293	0,81
Z2U3R2P3	0,65	0,54	0,45	0,43	0,30	0,55	0,241	0,223	0,86
Z2U3R3P1	0,47	0,51	0,32	0,51	0,48	0,94	0,032	-0,039	0,74
Z2U3R3P2	0,54	0,51	0,33	0,55	0,47	0,91	0,044	-0,012	0,78
Z2U3R3P3	0,53	0,48	0,35	0,69	0,42	0,88	0,060	-0,167	0,75

Anexo 3 Coeficiente de correlación de las propiedades físicas y químicas del área total de estudio

Correlaciones															
	C	pH	CE	Arena	Arcilla	Limo	Fe _o	Al _o	Si _o	Fe _p	Al _p	Al _p /Al _o	Al _o -Al _p	Fe _o -Fe _p	Al _o +1/2Fe _o
C	1														
pH	0,011	1													
CE	-0,129	-,776**	1												
Arena	-,948	-0,040	0,222	1											
Arcilla	,433**	0,196	-,418**	-,604**	1										
Limo	1,000	0,011	-0,129	-,948**	,433	1									
Fe _o	-0,097	-0,212	-,554**	0,225	-,337	-0,096	1								
Al _o	-0,125	0,160	-0,062	0,121	-0,131	0,125	-,434**	1							
Si _o	-0,030	,490**	-,405**	-0,027	,284	0,030	-0,124	-,305	1						
Fe _p	-0,081	,446**	-,340	0,086	0,041	0,081	0,174	-0,206	-0,022	1					
Al _p	-0,178	0,064	0,219	0,157	-0,149	0,178	-,431**	-,566	0,200	-0,080	1				
Al _p /Al _o	-0,152	0,015	-0,200	0,115	-0,079	0,152	0,225	0,001	0,022	0,041	-,817**	1			
Al _o -Al _p	0,116	0,049	0,215	-0,093	0,076	0,116	0,177	0,108	0,000	-0,066	-,759**	-,984**	1		
Fe _o -Fe _p	-0,039	-,461**	-,709**	0,154	-,331*	-0,039	-,807**	-,272	-0,100	-,440**	-,345	-0,230	0,201	1	
Al _o +1/2Fe _o	-0,208	-,337	-,382	-,307	-,407**	0,208	-,356	-,687	-,417**	-0,073	0,239	-0,181	0,255	-,369	1

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Anexo 4 Coeficiente de correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo bajo Bosque

Correlaciones Bosque															
	C	pH	CE	Arena	Arcilla	Limo	Fe _o	Al _o	Si _o	Fe _p	Al _p	Al _p /Al _o	Al _o -Al _p	Fe _o -Fe _p	Al _o +1/2Fe _o
C	1														
pH	0,435	1													
CE	-,471*	,886**	1												
Arena	-,960**	-,435	,514	1											
Arcilla	,496	0,271	-,425	,719**	1										
Limo	1,000**	0,435	-,471*	,960**	,497	1									
Fe _o	-,671**	-,514	,625**	,683**	-,454	,670**	1								
Al _o	0,298	-,183	0,004	0,215	0,076	0,298	-,217	1							
Si _o	-0,080	0,352	-,356	0,048	0,349	0,080	0,007	-,572*	1						
Fe _p	0,257	,537*	-,571*	-,251	0,138	0,257	-,110	0,124	0,299	1					
Al _p	0,118	0,040	0,128	0,085	0,029	0,118	0,065	0,286	-,177	,500*	1				
Al _p /Al _o	-0,141	0,073	-,087	0,110	0,011	-,141	0,280	-,469	0,282	,557*	,708**	1			
Al _o -Al _p	0,138	-,112	0,108	-,099	0,036	0,138	-,231	,556	-,307	-,533	,637**	-,991	1		
Fe _o -Fe _p	-,660**	,696**	,801**	,665**	-,427	,660**	,831**	-,098	0,162	-,645**	0,230	-,096	0,121	1	
Al _o +1/2Fe _o	-0,127	-,483	0,375	0,213	-,346	0,127	0,403	,806	-,533	0,183	0,307	-,270	0,382	0,412	1

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Anexo 5 Coeficiente de correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo bajo Pajonal

Correlaciones Pajonal															
	C	pH	CE	Arena	Arcilla	Limo	Fe _o	Al _o	Si _o	Fe _p	Al _p	Al _p /Al _o	Al _o -Al _p	Fe _o -Fe _p	Al _o +1/2Fe _o
C	1														
pH	0,320	1													
CE	-,560*	-,772**	1												
Arena	-,981**	0,244	-,492	1											
Arcilla	-,744**	0,000	0,222	-,860**	1										
Limo	1,000**	0,319	-,560*	-,981**	-,744**	1									
Fe _o	-0,382	-,545*	-,667**	0,374	-	-	1								
Al _o	-,492	-	0,198	-,538	-,556*	-,492	0,193	1							
Si _o	0,378	0,453	-	-	-,480*	0,379	-	-,730**	1						
Fe _p	0,182	-,655**	-,669**	0,093	0,155	0,182	-,513*	0,186	0,086	1					
Al _p	-0,359	-	-	0,405	-	-	0,128	-,628**	-,664**	0,248	1				
Al _p /Al _o	-0,155	0,096	-	0,181	-	-	0,050	0,201	-	0,209	-,887**	1			
Al _o -Al _p	0,191	-	0,138	-	0,271	0,191	-	0,448	-	0,212	-,916**	-,996**	1		
Fe _o -Fe _p	-0,312	-	-,767**	0,251	-	-	-,839**	-	-	-	-	-0,107	0,104	1	
Al _o +1/2Fe _o	-,564*	-	0,417	-,601*	-,583	-,564	-,536	-,932**	-,755**	-	-,588	0,191	-0,249	0,294	1
		0,335								0,030					

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Anexo 6 Coeficiente de correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo bajo Humedal

Correlaciones Humedal															
	C	pH	CE	Arena	Arcilla	Limo	Fe _o	Al _o	Si _o	Fe _p	Al _p	Al _p /Al _o	Al _o -Al _p	Fe _o -Fe _p	Al _o +1/2Fe _o
C	1														
pH	-0,303	1													
CE	0,236	,815**	1												
Arena	-,963**	0,283	-0,215	1											
Arcilla	0,245	0,448	-,534**	-0,277	1										
Limo	1,000**	-0,303	0,236	-,963**	0,245	1									
Fe _o	0,417	-0,452	,512**	-0,407	-0,198	0,417	1								
Al _o	-,480**	0,455	-0,419	,541**	-0,050	-,480**	-0,435	1							
Si _o	-0,150	,473**	-0,275	0,249	-0,083	-0,150	-0,295	,706**	1						
Fe _p	-0,214	0,189	-,481**	0,144	0,404	-0,213	-0,262	-0,017	-0,356	1					
Al _p	-,683**	0,181	-0,204	,756**	-0,400	-,683**	-0,359	,625**	0,421	0,044	1				
Al _p /Al _o	-0,422	-0,284	0,238	0,446	-0,462	-0,422	-0,003	-0,270	-0,274	0,084	,571**	1			
Al _o -Al _p	0,175	0,347	-0,279	-0,182	0,380	0,175	-0,126	,513**	0,384	-0,069	-0,350	-,952**	1		
Fe _o -Fe _p	0,407	-0,417	,625**	-0,361	-0,366	0,407	,834**	-0,288	0,002	-0,750**	-0,272	-0,050	-0,047	1	
Al _o +1/2Fe _o	-0,186	0,132	-0,049	0,257	-0,205	-0,186	0,311	,721**	,518**	-0,219	0,383	-0,287	0,444	0,338	1

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Anexo 7: Resumen de análisis de Regresión Lineal Múltiple para bosque, pajonal y humedal.

Resumen del modelo de Bosque				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,960 ^a	,922	,917	,8652

a. Predictores: (Constante), arena

ANOVA del Bosque						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	142,156	1	142,156	189,891	,000 ^b
	Residuo	11,978	16	,749		
	Total	154,134	17			

a. Variable dependiente: C

b. Predictores: (Constante), arena

Modelo	Ecuación de regresión lineal múltiple
1	$C = 45.36 - 0.447 * Arena$

Resumen del modelo de Pajonal				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,981 ^a	,962	,959	,8204

a. Predictores: (Constante), arena

ANOVA del Pajonal						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	270,984	1	270,984	402,636	,000 ^b
	Residuo	10,768	16	,673		
	Total	281,753	17			

a. Variable dependiente: C

b. Predictores: (Constante), arena

Modelo	Ecuación de regresión lineal múltiple
1	$C = 43.81 - 0.435 * Arena$

Resumen del modelo de Humedal				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,963 ^a	,927	,923	1,8243
a. Predictores: (Constante), arena				

ANOVA del Humedal						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	679,823	1	679,823	204,269	,000 ^b
	Residuo	53,249	16	3,328		
	Total	733,072	17			

a. Variable dependiente: C

b. Predictores: (Constante), arena

Modelo	Ecuación de regresión lineal múltiple
1	$C = 61.08 - 0.64 * Arena$