UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Factores morfoclimáticos favorables para la preservación del carbono orgánico humificado en suelos de montaña, San Rafael (Perú)

Sandro Sardon Nina

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias
Medellín, Colombia
2019

Factores morfoclimáticos favorables para la preservación del carbono orgánico humificado en suelos de montaña, San Rafael (Perú)

Sandro Sardon Nina

Tesis de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias-Geomorfología y Suelos

Director:

MSc. Ing Geólogo. Luis Alberto Arias López

Línea de Investigación: Génesis del suelo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias

Medellín, Colombia

2019

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, que gracias a las enseñanzas de los profesores forman profesionales de gran sabiduría científica y técnica en el área de Geomorfología y Suelos.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo - PRONABEC, Perú, por el apoyo económico.

A mi familia Sardon Nina y Pari Morales por las palabras de ánimo durante el desarrollo de la maestría.

Al profesor Raúl Darío Zapata Hernández por la enseñanza en el área de Ciencia del Suelo y por el ánimo para abordar el estudio de la materia orgánica del suelo.

Al profesor Luis Alberto Arias López por la exigencia en la formación académica en el área de geomorfología.

Finalmente agradezco a los profesores Kenneth Roy Cabrera Torres, Orlado Simón Ruiz Villadiego, Nelson Walter Osorio Vega y Juan Carlos Loaiza Usuga por contribuir en mi formación profesional.

Resumen

El estudio se llevó a cabo en el distrito de San Rafael de la provincia de Ambo, ubicado en el departamento de Huánuco, Perú, donde se realizó la comparación del contenido de carbono orgánico en las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) y se realizaron comparaciones para conocer su asociación con el grado de humificación en cinco órdenes de suelo (de 4 Aridisols, de 13 Entisols, de 6 Histosols, de 13 Inceptisols y 6 Mollisols). Posteriormente, se relacionaron los factores morfoclimáticos que condicionan el grado de humificación y el contenido de carbono orgánico en los AH y AF mediante la ecuación funcional de factores de estado del suelo propuesto por Jenny (1941). La extracción y fraccionamiento, así como el grado de humificación se realizó por el método Nagoya propuesta por Kumada (1987). La cuantificación del carbono orgánico se determinó por el método Walkley y Black (1934). Los parámetros morfométricos del relieve se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) y el parámetro climático del sensor MODIS.

De acuerdo con los resultados el contenido promedio de carbono orgánico de los AH del orden Aridisol (0.13g $100g^{-1}$) difiere del de los Histosoles (5.56g $100g^{-1}$), Inceptisoles (0.93g $100g^{-1}$) y Mollisoles (2.82g $100g^{-1}$). El orden Entisol (0.27g $100g^{-1}$) presentó diferencias con los Histosoles y Mollisoles, los suelos del orden Inceptisol presentaron diferencias con los Aridisoles e Histosoles y los del orden Histosol se diferenciaron de los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles. De la misma forma, los del orden Mollisol difirieron con los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles.

En la fracción de los AF el contenido promedio de carbono orgánico del orden Aridisol (0.10g $100g^{-1}$) difirió del encontrado en los Histosoles (1.43g $100g^{-1}$), Inceptisoles (0.34g $100g^{-1}$) y Mollisoles (0.73g $100g^{-1}$). El orden Entisol (0.22g $100g^{-1}$) se diferenció de los Mollisoles; así mismo, el orden Inceptisol difirió de los Aridisoles y Mollisoles y el orden Histosol se diferenció de los Aridisoles. Por último, el orden Mollisol se diferenció también de los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles.

Los tipos de suelo según el presente estudio, no están asociados o no muestran patrones de humificación, lo cual puede deberse a que las distinciones que se hacen al

clasificar los mismos, no se basan en los procesos pedogenéticos y éstos presentan una amplia gama de características en los horizontes superficiales; además se desarrollan en un rango amplio de climas, biota, relieve y material parental en un tiempo transcurrido. Se encontró que el factor relieve condiciona al grado de humificación y el factor clima condiciona el contenido de carbono orgánico en los AH y AF.

Palabras clave: Ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, humificación, factores, morfometría.

Abstract

This study was done in the district of San Rafael Ambo province, localized in Huánuco departament Peru. Comparison between organic carbon was made in the humic and fulvic fractions (HA) (FA). Comparison were made in order to know the humidification grade and it's association with the humidification in five soil orders (4 Aridisols, 13 Entisols, 6 Histosols, 13 Inceptisols and 6 Mollisols).

Morphoclimatic factors which condition the humidification grade and the organic carbon present in HA and FA were estimated using the functional equation proposed by Jenny (1941). The extraction, fractioning and humidification grade estimation were made using Nagoya method proposed by Kumada (1987). The quantification of organic material was obtained by using the method of Walkley and Black (1934). Morphometric parameters of landform were estimated based on the digital elevation model (DEM) and climatic parameter of MODIS sensor.

According to the ressults the organic amount of HA from Aridisol (0.13g $100g^{-1}$) order differs from the one found in Histosols (5.56g $100g^{-1}$), Inceptisols (0.93g $100g^{-1}$) and Mollisols (2.82g $100g^{-1}$). The Entisol order (0.27g $100g^{-1}$) exhibited differences with Histosols and Mollisols. Soils of Inceptisol order showed differences with Aridisols and Histosols and Histosol order ressults were also different when compared with Aridisols, Entisols and Inceptisols. In the same way order Mollisol estimates were different from the obtained in Aridisols, Entisols and Inceptisols.

Related to the FA the media content of organic carbon, values in Aridisol order (0.10g $100g^{-1}$) were different from those found in Histosols (1.43g $100g^{-1}$), Inceptisols (0.34g $100g^{-1}$) and Mollisols (0.73g $100g^{-1}$). The Entisol order (0.22g $100g^{-1}$) was differentiated from Mollisols and Inceptisol order from Aridisols and Mollisols. Histosol order was also differentiated from Aridisols. Lastly, Mollisol order values were different among Aridisols, Entisols and Inceptisols.

The studied soils in the present study did not showed humidification patterns which may be related to the way in which classifications of such soils are made. Schemes are not based on pedogenetic processes and the soils present variations in characteristics observed in the horizons. Also, they are developed in a variable range of weather, biota

and parental material in an elapsed time. According to the results the landform is conditioning humidification and climate is conditioning organic content in HA and FA.

Keywords: Humic acid, fulvic acid, humification, factors, morphometry.

Contenido

Pág.

1. Capítulo 1: Marco teórico 5
1.1 La materia orgánica del suelo (MOS) 5
1.2 Sustancias húmicas (SH) 6
1.3 Importancia de las sustancias húmicas 6
1.4 Fracciones húmicas 7
1.4.1 Ácidos húmicos (AH) 7
1.4.2 Ácidos fúlvicos (AF) 8
1.4.3 Huminas (HN) 8
1.5 Formación de las sustancias húmicas 8
1.5.1 Teoría de la lignina (ruta 4) 9
1.5.2 Teoría del polifenol (ruta 2 y 3) 9
1.5.3 Teoría de condensación de aminoazúcares (ruta 1) 10
1.6 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo 11
1.7 Caracterización del humus 13
1.8 Calidad de la materia orgánica del suelo 13
1.9 Factores de estado de formación del suelo 14
1.9.1 Factor Tiempo (t) 17
1.9.2 Factor Material Parental (p) 17
1.9.3 Factor Relieve (r) 17
1.9.4 Factor Organismos (o) 18
1.9.5 Factor Clima (cl) 18
1.10 Parámetros morfométricos del relieve 18
1.10.1 Pendiente del terreno 19
1.10.2 Orientación de la vertiente (aspect) 19
1.10.3 Curvatura del terreno 19
1.10.4 Índice Topográfico de humedad (ITH) 20

2. Capítulo 2: Comparación del carbono orgánico proveniente de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos y el grado de humificación de los ácidos húmicos de cinco órdenes de suelos 23
2.1 Introducción 24
2.2 Materiales y métodos 25
2.2.1 Descripción del área de estudio 25
2.2.2 Muestreo 27
2.2.3 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo 28
2.2.4 Caracterización química de los ácidos húmicos 29
2.2.5 Cuantificación del carbono orgánico 30
2.2.6 Análisis estadístico 30

2.3 Resultados y discusión 30
2.3.1 Comparación del contenido de carbono orgánico de los AH y AF en los suelos. 32
2.3.2 Comparación del grado de humificación en los suelos 35

3. Capítulo 3: Factores morfoclimáticos favorables para la preservación del carbono orgánico humificado en suelos de montaña 37
3.1 Introducción 37
3.2 Materiales y métodos 39
3.2.1 Descripción del área de estudio 39
3.2.2 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo 39
3.2.3 Caracterización química de los ácidos húmicos 40
3.2.4 Cuantificación del carbono orgánico 40
3.2.5 Obtención de factores morfoclimáticos 40
3.2.6 Análisis estadístico 41
3.3 Resultados y discusión 42
3.3.1 Grado de humificación 42
3.3.2 Factor de estado que condiciona el proceso de humificación 43
3.3.3 Factor de estado que condiciona el contenido de carbono orgánico en los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) 45

4. Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones 49
4.1 Conclusiones 49
4.2 Recomendaciones 50

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Clasificación y propiedades químicas de las sustancias orgánicas (Stevenson, 1994). 7
Figura 1-2: Mecanismos de formación de las sustancias húmicas en el suelo. Se observa que los compuestos amino sintetizados por microorganismos reaccionan con la lignina modificada (ruta 4), quinonas (ruta 2 y 3) y azúcares reducidos (ruta 1) para formar polímeros complejos de color oscuro (Stevenson, 1994). 10
Figura 1-3: Esquema para el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (Stevenson, 1994). 12
Figura 1-4: Diagrama de clasificación del ácido húmico (Kumada, 1987). 13
Figura 1-5: Un plano ortogonal a la superficie S en el punto X da como resultado una curva de la intersección (Olaya, 2014). 19
Figura 1-6: Dos mecanismos de acumulación de flujos impulsados por la gravedad: (A) Vista de perfil. Desaceleración/aceleración relativa del flujo: el flujo desacelera (áreas de desaceleración relativa, D) y acelera (áreas de aceleración relativa, A). (B) Vista en planta. Flujo de convergencia o denudación/divergencia o acumulación: las líneas de flujo convergen (áreas de convergencia, blanco) y divergen (áreas de divergencia, gris) (Florinsky, 2016). 20
Figura 2-1: Ubicación del área de investigación. 26
Figura 2-2: Órdenes de suelos en el distrito de San Rafael. 28
Figura 2-3: Diagramas de caja de contenido de carbono proveniente de los ácidos húmicos (a) y ácidos fúlvicos (b) en cinco órdenes de suelos. 32
Figura 2-4: Distribución de las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF). 33
Figura 2-5: Distribución del grado de humificación en los diferentes órdenes de suelos. 35
Figura 3-1: Clasificación de los tipos de ácidos húmicos en suelos de montaña. 42
Figura 3-2: Grado de humificación en la curvatura de perfil de la vertiente. 44
Figura 3-3: Relación entre la temperatura de la superficie terrestre (TST) y los contenidos de carbono orgánico. a) TST con CO en los ácidos húmicos y b) TST con CO los ácidos fúlvicos. 46

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Ubicación de los puntos muestreados.....27
Tabla 2-2: Contenido de carbono orgánico proveniente de los ácidos húmicos y fúlvicos, y el grado de humificación en diferentes órdenes de suelos.....30
Tabla 2-3: Comparación de medias del carbono orgánico en los ácidos húmicos (AH), en los cinco órdenes de suelos. 34
Tabla 2-4: Comparación de medias del carbono orgánico en los ácidos fúlvicos (AF), en los cinco órdenes de suelos 35
Tabla 3-1: Coeficientes entre las variables morfoclimáticas y el grado de humificación (p es el nivel de significancia). 43
Tabla 3-2: Coeficientes entre las variables morfoclimáticas y contenido de carbono orgánico en los AH y AF (p es el nivel de significancia). 46

Lista de esquemas

Pág.

Esquema 3-1: Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo 39

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
AC	Área de acumulación
AH	Ácidos húmicos
AF	Ácidos fúlvicos
COS	Carbono orgánico del suelo
g	Gramo
HN	Huminas
ITH	Índice Topográfico de Humedad
K	Extinción o absorbancia
kg	Kilogramo
MDE	Modelo Digital de Elevación
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOS	Materia orgánica del suelo
Pg	Picogramo
RF	Densidad de color del ácido húmico
Rp	Primeros estados de humificación
SH	Sustancias húmicas
t	Tonelada
TST	Temperatura de la superficie terrestre
UV	Ultravioleta
SIG	Sistema de Información Geográfica

Introducción

La materia orgánica del suelo (MOS) es el componente más complejo y menos comprendido de la Ciencia del Suelo. La MOS es una mezcla de residuos de plantas, microbios y animales en diversas etapas de descomposición y sustancias orgánicas heterogéneas estrechamente asociados a la fracción mineral (Kononova, 1975; Christensen, 1992; Zaccone, 2018; Osorio, 2018; Gallardo, 2016). Por tanto, quedan excluidos los residuos orgánicos que están sobre el suelo denominados mantillo, hojarasca o rastrojo y animales sin descomponer (Gallardo, 2016). Según Kononova (1966) la MOS se puede reunir fundamentalmente en dos grupos: 1. La descomposición de los componentes originales de los tejidos y su conversión por microorganismos en compuestos químicos más simples identificables por la química orgánica (proteínas y aminoácidos, hidratos de carbono simple y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros) y productos generados por la completa mineralización de las moléculas mencionadas anteriormente (producción de CO_2 por respiración, NO_2, NO_3, NH_3, CH_4, H_2O) y 2. La síntesis de compuestos orgánicos con la formación de sustancias húmicas de alto peso molecular. A este conjunto de procesos se les denomina humificación y producen una mezcla de sustancias que tienen alta resistencia al posterior ataque microbiano y son completamente diferentes a cualquier sustancia vegetal o animal (Ramesh et al., 2019; Duchaufour, 1987).

La mayor parte de la MOS en la mayoría de los suelos consiste en una serie de sustancias de color marrón a negro a las que se hace referencia con nombres como ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (HN) (Stevenson y Olsen, 1989; Stevenson y Cole, 1999; El-Metwally et al., 2014).

La MOS o el humus es producto del proceso pedogenético de humificación (Simonson, 1959; Fanning y Fanning, 1989; Zapata, 2001, 2006, 2014; Buol et al., 2011), definida por los factores de formación del suelo como: el clima, organismos, material parental y el tiempo (Jenny, 1941, 1980). Por lo tanto, la MOS cobra una importancia fundamental en

la formación de los suelos (pedogénesis) teniendo una fuerte influencia sobre las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo (Gallardo, 2016), como la formación y estabilización de los agregados, en el aumento de la capacidad de intercambio catiónico y capacidad buffer, en la mejora de la fertilidad del suelo de manera indirecta, en la quelación provocando la movilización o inmovilización de iones metálicos (Cd, Cu, Hg, Pb), en la descomposición y alteración de los minerales primarios y secundarios a las formas más estables (meteorización mineral) y adsorción de pesticidas. Además, permite el secuestro de carbono orgánico (CO) en el suelo.

El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) de los horizontes superiores en los suelos (Epipedones) está entre 1200 a 1500 Pg de C (1 Pg = 10^{15} g = 10^{12} kg = 10^{9} t) (Gallardo y Merino, 2007) y el contenido de carbono orgánico en las sustancias húmicas o humus representa del 60 al 80% del COS (Piccolo et al., 2018; Ismail-Meyer, 2018). En estudios realizados con anterioridad han enfatizado que los suelos de praderas (Mollisol) y turba (Histosol) generalmente tienen mayor proporción del contenido de AH con respecto a los AF (Kononova, 1966; Gallardo, 2016). Además, Stevenson (1994) y Zamboni et al. (2006) encontró mayor contenido carbono orgánico de los AH que en otros órdenes de suelos.

Las tierras del distrito de San Rafael se encuentran en la zona ecológica de estepa, bosque seco, bosque húmedo y en el páramo. Hacia las zonas del páramo se presenta una expansión de actividades agrícolas situadas en las vertientes de montaña realizando prácticas de labranza que conducen a empeorar las propiedades físicas, químicas, y bio-orgánicas. Una consecuencia de la actividad agrícola es la pérdida de las sustancias húmicas o humus que no se suple por procedimientos agro-técnicos. Un cambio leve en la reserva estable de carbono orgánico del suelo tendrá, sin duda, un gran impacto en la concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (Li et al., 2019). La alternativa al posible exceso de CO_2 atmosférico podría ser reconducir el ciclo natural del C hacia la fijación o captura de éste en los compartimentos vegetales y edáficos de los ecosistemas y, a la vez, disminuir la actividad microbiana edáfica con el objeto de moderar la mineralización (emisiones) (Gallardo, 2016).

Este trabajo se divide en 3 capítulos. En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico. Contiene conceptos básicos sobre la materia orgánica del suelo MOS, sustancias

húmicas, factores de estado de formación del suelo y parámetros morfo-métricos del relieve. El segundo capítulo titulado, " Comparación del carbono orgánico proveniente de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos y el grado de humificación de los ácidos húmicos de cinco órdenes de suelos " contiene los resultados del primer objetivo de esta tesis, donde se realizó la extracción y fraccionamiento de las sustancias húmicas y la clasificación del grado de humificación para realizar la comparación en cinco órdenes de suelos.

En el tercer capítulo titulado, "Factores morfoclimáticos favorables para la preservación del carbono orgánico humificado en suelos de montaña" contiene los resultados del segundo y tercer objetivo, donde se indican las condiciones morfoclimáticas favorables para el grado de humificación y los contenidos de carbono orgánico en las fracciones de los AH y AF. Para modelar estas relaciones se utilizó la ecuación de estado propuesto por Jenny. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta investigación. El segundo y tercer capítulo están en formato artículo.

Hipótesis

- Se presentan diferencias sustanciales en el contenido de carbono orgánico y grado de humificación en los distintos órdenes de suelos: Aridisols, Entisols, Histosols, Inceptisols y Mollisols.
- Las posiciones geo-morfométricas del terreno condicionan el contenido de carbono orgánico y el grado de humificación.
- El régimen térmico condiciona el contenido de carbono orgánico y el grado de humificación.

Objetivos

General

- Identificar los factores morfoclimáticos que condicionan el contenido del carbono orgánico y el grado de humificación en los suelos del distrito de San Rafael.

Específicos

- Establecer comparaciones e identificar relaciones entre los contenidos de carbono orgánico y grado de humificación en los diferentes órdenes de suelos: Aridisols, Entisols, Histosols, Inceptisols y Mollisols.

- Identificar los parámetros morfométricos del relieve que condicionan el contenido de carbono orgánico y el grado de humificación.
- Establecer la relación entre la temperatura de la superficie con el contenido de carbono orgánico y el grado de humificación.

1. Capítulo 1: Marco teórico

1.1 La materia orgánica del suelo (MOS)

Según Osorio (2018) la materia orgánica del suelo (MOS) es una mezcla de residuos orgánicos de origen vegetal y animal en diversos estados de descomposición. Se pueden encontrar materiales parcialmente descompuesto (detritos), microbios y animales en diversas etapas de descomposición, hasta coloides orgánicos que forman complejos con los minerales del suelo (materia orgánica humificada), con excepción de tejidos de plantas y animales sin descomponer. La MOS, en la Ciencia del Suelo se considera como el componente más complejo y menos comprendido del suelo (Kononova, 1975; Christensen, 1992; Zaccone et al., 2018).

La mayor parte de la materia orgánica en la mayoría de los suelos consiste en una serie de sustancias de color marrón a negro a las que se hace referencia con nombres como ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas (Stevenson y Olsen, 1989; Stevenson y Cole, 1999; El-Metwally et al., 2014).

El humus y MOS son términos sinónimos, es decir, describen un mismo hecho. Los términos humus y hojarasca o mantillo describen objetos y situaciones muy diferentes respecto al estado de los materiales orgánicos que se incorporan al suelo. Humus o MOS están compuestos de sustancias húmicas, parte de las cuales se desarrollan a partir de la descomposición de residuos orgánicos de origen vegetal o animal (Gallardo, 2016; Stevenson, 1994).

1.2 Sustancias húmicas (SH)

Según Stevenson (1994) las SH son una serie de sustancias de peso molecular relativamente alto que varían desde unos pocos cientos para los ácidos fúlvicos hasta más de 300000 para los ácidos húmicos (Figura 1-1), presentando un rango de color desde el amarillo hasta el negro, formadas por reacciones de síntesis secundaria. El término se usa como un nombre genérico para describir el material coloreado o sus fracciones obtenidas sobre las características de solubilidad. Estos materiales son propios de las condiciones del suelo (o de los sedimentos) porque son diferentes a los biopolímeros de los microorganismos y de las plantas superiores (incluyendo la lignina).

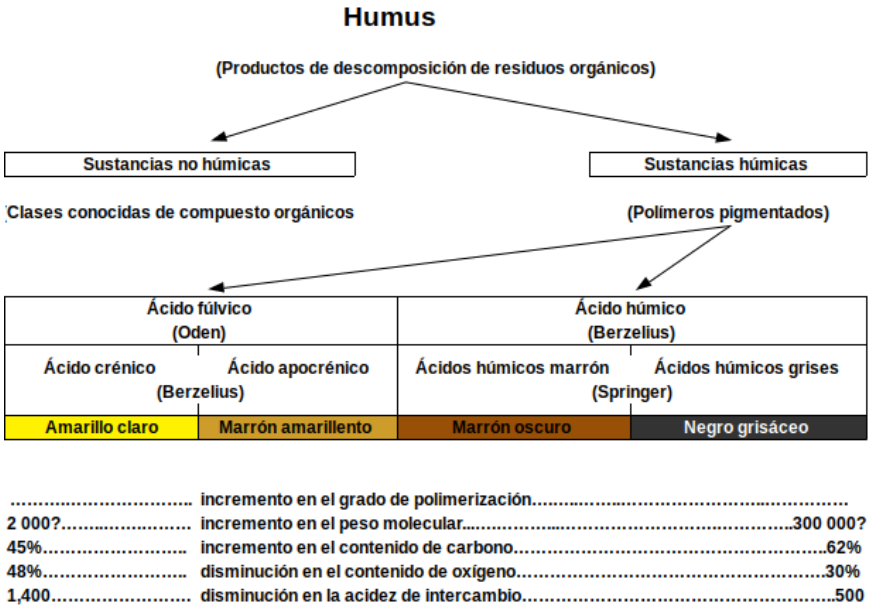
1.3 Importancia de las sustancias húmicas

Este componente recalcitrante actúa en la formación y estabilización de los agregados, en el aumento de la capacidad de intercambio catiónico y capacidad buffer, en la mejora de la fertilidad del suelo de manera indirecta, en la quelación provocando la movilización o inmovilización de iones metálicos, en la descomposición y alteración de los minerales primarios y secundarios a las formas más estables (meteorización mineral) y adsorción de pesticidas. Además, los grupos funcionales del carbono orgánico de las fracciones húmicas son relativamente resistentes a la degradación microbial, manifestándose en la estabilidad y almacenamiento de carbono en el suelo (Vasilevich et al., 2018; Pefferkorn, 1997).

La MOS es importante en la clasificación de suelos según los niveles (Orden, Suborden, Gran Grupo y Subgrupo) e interpretación de levantamientos de suelos que se usa a menudo mediante los criterios de identificación de los horizontes de diagnóstico (epipedones y endopedones) (Stevenson, 1994; Soil Survey Staff, 1999).

El humus o las sustancias húmicas son el producto del proceso pedogenético definida por los factores de formación del suelo como el clima, organismos, material parental, relieve y el tiempo (Simonson, 1959; Kumada, 1987; Fanning y Fanning, 1989; Zapata, 2001, 2006, 2014; Buol et al., 2011).

Figura 1-1: Clasificación y propiedades químicas de las sustancias orgánicas (Stevenson, 1994).



1.4 Fracciones húmicas

La mayor proporción de la MOS consiste en una serie de sustancias de color marrón a negro que resultan de fraccionar las sustancias húmicas mediante un procedimiento de tipo químico que permite diferenciar estas sustancias basadas en la solubilidad de las moléculas en medios ácidos y básicos, haciendo referencia con nombres como ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (HN).

1.4.1 Ácidos húmicos (AH)

Los ácidos húmicos (AH) son sustancias de color oscuro que se extraen del suelo por soluciones alcalinas y que precipitan en un medio ácido. Esta fracción se considera como polímeros amorfos, conformados de monómeros y esto a su vez formado por unidades estructurales compuestas de: 1) un núcleo, 2) una cadena y 3) grupos orgánicos reactivos, que se representan entrelazados formando coloides esferoidales (Bravo et al., 2016; Zapata, 2006, 2014).

1.4.2 Ácidos fúlvicos (AF)

Los ácidos fúlvicos son la fracción de las sustancias orgánicas de la solución ácida que quedan después de precipitar el ácido húmico. Estas sustancias son móviles, solubles en ácidos y álcali, aparentemente son materiales jóvenes no asociados con la fracción mineral, formados por polisacáridos, aminoácidos y compuestos fenólicos que presentan altos contenidos de grupos carboxílos (Bravo et al., 2016; Kumada, 1987). Algunos autores, mencionan que los AF se consideren como fragmentos oxidados de los AH, mientras que otros indican que son los precursores de los AH (Bravo et al., 2016; Zapata, 2006, 2014). Por tanto, los ácidos fúlvicos han recibido menor atención en su estudio. En el suelo, esta fracción es responsable de la quelación de los elementos metálicos (Gallardo, 2016).

1.4.3 Huminas (HN)

Las huminas son la materia orgánica altamente condensada que ha interaccionado fuertemente con materiales arcillosos y de extracción difícil con los reactivos alcalinos (Bravo et al., 2016; Gallardo, 2016; Stevenson, 1994; Kononova, 1966), siendo insoluble en soluciones alcalinas y ácidos. Las huminas quedan después de la extracción soluble. Debido a su insolubilidad y las consiguientes dificultades en la extracción han hecho que sea difícil de estudiar, además, las huminas son los compuestos que menos han llamado la atención de la investigación, aunque su presencia se conoce desde los primeros días de la ciencia de los ácidos húmicos (Tan, 2014; Hayes et al., 2017) y en la mayoría de los casos se consideran como el componente principal de la materia orgánica del suelo y representa el 50% o más de carbono orgánico en suelos minerales (Hayes et al., 2017).

Hatcher, citado por Tan (2014), se hace una distinción entre las huminas en condiciones aeróbicos y las huminas en suelos anaeróbicos (turba, como son en algunos Histosols). Ambos tipos o grupos de huminas parecen ser similares en composición, y difieren solo en el grado y la velocidad de descomposición del polisacárido.

1.5 Formación de las sustancias húmicas

Según Zapata (2006, 2014) y Stevenson (1994) la formación de las sustancias húmicas es uno de los aspectos menos conocido de la Química del suelo y uno de los más

interesantes, aunque continuamente se está investigando. En ese contexto, Kononova (1975) declaró: "aunque muchas preguntas sobre la naturaleza y las propiedades de la materia orgánica del suelo permanecen ocultas, no se debe a la carencia del esfuerzo por parte de los investigadores, sino a la complejidad del problema".

Stevenson (1994) plantea varias vías para la formación de sustancias húmicas durante la descomposición de restos de plantas y animales en el suelo, las principales que se muestran en la Figura 1-2. La teoría clásica, de Waksman, es que las sustancias húmicas representan ligninas modificadas (ruta 4), pero la mayoría de los investigadores actuales prefieren un mecanismo que involucre a las quinonas (ruta 2 y 3). En la práctica, las cuatro vías deben considerarse como mecanismos probables para la síntesis de ácidos húmicos y fúlvicos en la naturaleza, incluida la condensación de aminoazúcares (ruta 1).

1.5.1 Teoría de la lignina (ruta 4)

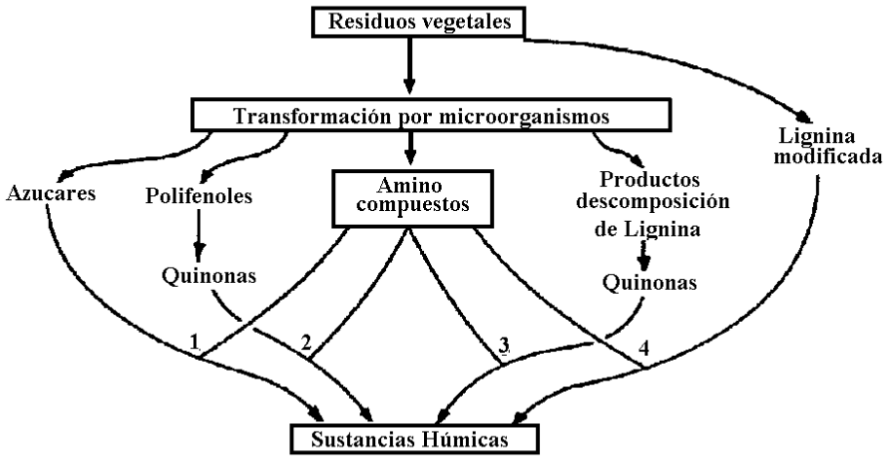
Esta teoría considera que los residuos vegetales están incompletamente degradados por los microorganismos y que los residuos llegan a ser parte de las sustancias húmicas, es por ello que la lignina es atacada microbialmente con menor facilidad que otros componentes de las plantas. La modificación de la lignina incluye una pérdida de grupo metoxi ($-OCH_3$) con la generación de o-hidroxifenoles y la oxidación de cadenas alifáticas con la formación de grupos ácidos (-COOH) (Stevenson, 1994). Según la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas por sus siglas en inglés IHSS citado por Gonzáles (2008) el material modificado es sometido posteriormente a procesos desconocidos para permitir la formación de los ácidos húmicos y posteriormente los ácidos fúlvicos.

1.5.2 Teoría del polifenol (ruta 2 y 3)

En esta teoría, los materiales de partida son compuestos orgánicos de bajo peso molecular, a partir de los cuales se forman moléculas grandes por condensación y polimerización. En la ruta 3, los aldehidos fenólicos y ácidos liberados durante el ataque microbial de la lignina sufren un ataque enzimático y llevan a la conversión de quinonas, las cuales polimerizan en presencia o ausencia de compuestos aminados para formar macromoléculas similares a las sustancias húmicas. La ruta 2 es similar a la ruta 3, excepto que los polifenoles los sintetizan los microrganismos de fuentes de carbono diferentes a la lignina, por ejemplo, utilizando la celulosa. Los polifenoles se oxidan luego

enzimáticamente a quinonas y se convierten a sustancias húmicas por la ruta 3 (Stevenson, 1994).

Figura 1-2: Mecanismos de formación de las sustancias húmicas en el suelo. Se observa que los compuestos amino sintetizados por microorganismos reaccionan con la lignina modificada (ruta 4), quinonas (ruta 2 y 3) y azúcares reducidos (ruta 1) para formar polímeros complejos de color oscuro (Stevenson, 1994).



1.5.3 Teoría de condensación de aminoazúcares (ruta 1)

Esta teoría se designa con diferentes nombres, algunos la han llamado ruta melanoidina y la reacción de Maillard. El fundamento de esta teoría utiliza el azúcar y la amina como componentes de partida y clave para la síntesis de las sustancias húmicas, y no se requieren derivados de lignina o no son prevalentes (Tan, 2014). Los azúcares reducidos y los aminoácidos, formados como subproductos del metabolismo microbial sufren polimerización no enzimática, para formar polímeros nitrogenados de color marrón del tipo producido durante la deshidratación de ciertos productos alimenticios (Stevenson, 1994).

Zapata (2006, 2014) enfatiza, que no se ha desarrollado actualmente una teoría que logre explicar satisfactoriamente la formación de las sustancias húmicas en diversos ambientes pedogénicos. Estas cuatro rutas descritas anteriormente pueden operar en todos los suelos, pero no en el mismo grado u orden de importancia.

1.6 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

Los métodos de extracción de la materia orgánica del suelo utilizan por lo general, extractantes inorgánicos alcalinos. Los primeros métodos utilizaron NaOH, que fue aceptado como el extractor ideal para sustancias húmicas en el pasado. Sin embargo, con el avance de la química de los ácidos húmicos en el siglo XX, su idoneidad fue cuestionada por varios científicos por las preocupaciones sobre la creación de artefactos mediante la extracción de NaOH (Tan, 2014). Un adecuado procedimiento de extracción depende del uso del reactivo de extracción más correcto. Por tanto, Stevenson (1994) considera que un procedimiento de extracción ideal debería cumplir con lo siguiente:

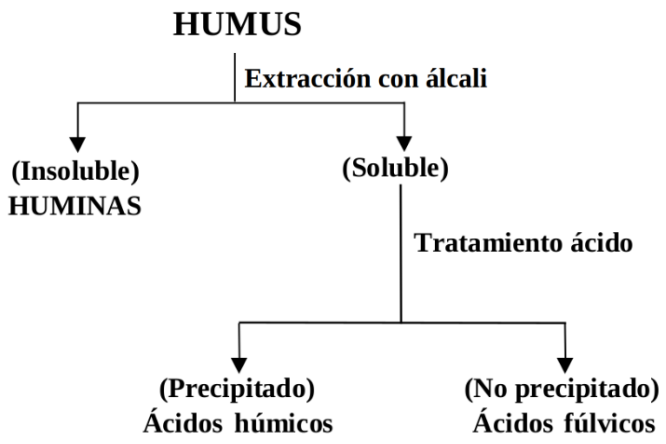
- Procurar aislar los materiales orgánicos sin transformarlos.
- Los materiales húmicos extraídos deben estar libres de contaminantes inorgánicos, como arcilla y cationes polivalentes.
- La extracción debe ser completa o casi completa, asegurando así la representación de las fracciones de todo el rango de peso molecular.
- El método debe ser universalmente aplicable a todos los suelos.

Los procesos estándar de extracción de las sustancias húmicas (Figura 1-3) usan agua como disolvente, involucrando soluciones básicas de hidróxido de sodio (NaOH), pirofosfato de sodio ($Na_4P_2O_7$), hidróxido de potasio (KOH), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), y floruro de sodio (NaF) (Bravo et al., 2016). El tratamiento con solución alcalina genera una parte insoluble que corresponde a las huminas (HN), la otra parte soluble son las fracciones húmicas (Zapata, 2006, 2014; Stevenson, 1994; Kumada, 1987). La extracción soluble se precipita, cuando se acidifica en un medio ácido, ya sea con ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se forma un precipitado que corresponde a los ácidos húmicos (AH), y el decantado que queda soluble corresponde a los ácidos fúlvicos (AF).

Hay procedimientos de extracción de las sustancias húmicas como es en la fracción HN que se basan en la eliminación de materia mineral inorgánica usando reactivos como el ácido clorhídrico (HCl) o ácido fluorhídrico (HF). Estos procedimientos en altas concentraciones son poco creíbles, puesto que ataques con reactivos tan agresivos dan,

sin duda, lugar a artefactos o provocar alteraciones en los grupos funcionales de la MOS (Gallardo, 2016; Hayes et al., 2017).

Figura 1-3: Esquema para el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (Stevenson, 1994).



Kumada (1987) y Kononova (1966) recomiendan como extractante, NaOH 0.1N (extracción única), NaOH 0.1N + $Na_4P_2O_7$ 0.1M (extracción mixta), NaOH 0.1N seguido por $Na_4P_2O_7$ 0.1M (extracción sucesiva). En el caso de los suelos deficientes en ácidos y bases que prevalecen puede utilizarse NaOH 0.1N, puede extraer una gran parte del humus soluble, pero una mezcla de NaOH 0.1 N + $Na_4P_2O_7$ 0.1M se han utilizado para suelos con un amplio rango de valores de pH.

El NaOH es un extractante que tiene la habilidad para degradar la materia orgánica del suelo y disolver el calcio, hierro y aluminio asociados a ella. La doble acción que tiene el extractante, por una parte, hace que se precipiten los hidróxidos de hierro y aluminio, liberando así los ácidos húmicos unidos a estos cationes, por otra parte, saponifica los enlaces entre los AH y AF. Mientras que el $Na_4P_2O_7$ dispersa el complejo húmico arcilloso y libera los compuestos húmicos de los compuestos insolubles saturados de calcio, hierro, o aluminio (Bravo et al., 2016). Gallardo (2016) menciona que el $Na_4P_2O_7$ tiene un carácter ligeramente básico que se puede tamponar a pH 8 ó 10.

1.7 Caracterización del humus

Kumada (1987) propuso un método de análisis de la composición del humus. Este sistema agrupa los AH en cuatro tipos: A, B, P y Rp, según su posición en el diagrama de ejes ortogonales cuyas coordenadas corresponden a los parámetros RF y Δlog K (Figura 1-4). Estos parámetros se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$\Delta log\ K = log\ K_{400} - log\ K_{600}$$

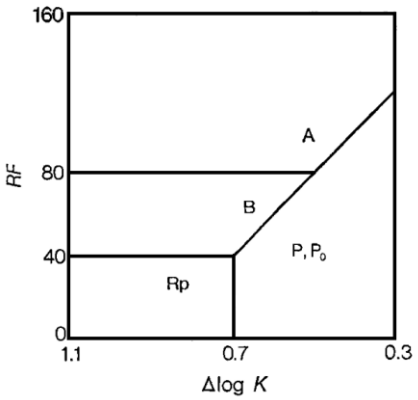
$$RF = K_{600}\ x\ 1{,}000/c$$

Donde:

$log\ K_{400}$ y $log\ K_{600}$ es la densidad óptica de una solución de AH a 400 y 600nm.

c = volumen en ml de 0.1N de $KMnO_4$ consumido por 30 ml de solución de AH utilizada para determinar el espectro de absorción.

Figura 1-4: Diagrama de clasificación del ácido húmico (Kumada, 1987).



1.8 Calidad de la materia orgánica del suelo

La calidad de la materia orgánica del suelo depende de su madurez, y se mide de acuerdo al grado de humificación (Bravo et al., 2016).

Según Kumada (1987) la humificación es un conjunto de procesos que transforman la materia orgánica en compuestos que tienen alta capacidad de absorción de la luz visible y unos altos contenidos de grupos orgánicos como carbonilo y carboxilo.

Para el caso del grado de humificación de los ácidos húmicos (AH), Kumada (1987) propone la teoría de formación de los AH. El proceso de humificación empieza con el tipo Rp (primeros estados de humificación de la materia orgánica), evolucionando al tipo B y finalmente al tipo A (cada tipo exhibe una forma relativamente estable). En suelos fuertemente ácidos, el tipo Rp puede reemplazarse por los de tipo P. Por tanto, el grado de humificación evoluciona en el siguiente orden: Tipo Rp, Tipo P, Tipo B y Tipo A (Katsumi, 2016; Ikeya y Watanabe, 2003).

Gallardo (2016) sugiere que para suelos negros de pradera (Mollisols), algunos de origen volcánico e, incluso, en general los suelos semiáridos, la fracción predominante son las huminas, por lo que el índice de calidad deberá ser la relación HN/(AF+AH); es decir, el cociente entre la fracción humificada no extraíble de la MOS dividida por la suma de las fracciones extraíbles. Esta relación se basa en la hipótesis más creíble de que cuanto menos extraíble sea la MOS, más estable es el complejo arcillo-húmico.

1.9 Factores de estado de formación del suelo

El suelo es el producto de los “factores de estado de formación del suelo” y se expresa mediante la siguiente ecuación funcional (Jenny, 1941, 1980):

$$\text{Suelo} = f(\text{cl, o, r, p, t} \ldots) \qquad (1)$$

Estos factores de estado corresponden a: clima (cl), organismos (o), topografía o relieve (r), material parental (p) y el tiempo (t). Los puntos suspensivos en la ecuación indican que, además de los cinco factores mencionados, se pueden incluir otras variables que pueden ser importantes localmente pero no universalmente como aportes de polvo eólico, la deposición de sulfato en la lluvia ácida o el fuego (Schaetzl y Anderson, 2005).

Estos factores formadores del suelo son variables independientes que definen al sistema suelo. En esta interpretación las propiedades del suelo y los procesos pedogenéticos se convierten en variables dependientes y pueden expresarse en función de los factores de estado.

Para determinar el papel que desempeña cada factor que forma el suelo, propiedades del suelo, funciones pedogenéticas y funciones del ecosistema es necesario que un factor varíe mientras que los otros se mantienen constantes. Hay cinco grupos amplios de

funciones de acuerdo con los cinco factores de estado (Jenny, 1941, 1958, 1961). Se pueden escribir de la siguiente manera:

Suelo = f(cl) o, r, p, t … *Función del clima*
suelo = f(o) cl, r, p, t … *Función de los organismos o la biota*
suelo = f(r) cl, o, p, t … *Función del relieve*
suelo = f(p) cl, o, r, t … *Función del material parental*
suelo = f(t) cl, o, r, p … *Función del tiempo*

Jenny (1961) desarrolló una expresión para ilustrar la influencia específica de los factores de estado en las propiedades seleccionadas del suelo. Específicamente, utilizó la siguiente expresión matemática:

$$\int_c^d \frac{\partial N}{\partial F} dF \qquad (2)$$

Esta expresión matemática consta de dos partes. Primero, indica que un factor *(F)* tiene una gama *(c → d)* en un terreno; segundo, la pendiente $(\partial N / \partial F)$ expresa la efectividad del factor de estado en el terreno (*N*= % promedio de nitrógeno en la superficie del suelo). Cuando la curva tiene una pendiente de cero, el factor no es eficaz; pero cuando la curva tiene una pendiente pronunciada (tasa de cambio), el factor de estado del terreno expresa efectividad.

La manera posible de obtener correlaciones cuantitativas entre el suelo, propiedades del suelo o procesos con los factores que forman el suelo es mediante análisis multivariado o métodos de ordenación (Jenny, 1961). Richardson y Edmonds (1987) sugieren la aplicación de las ecuaciones de regresión lineal describiendo segmentos de una curva para las propiedades del suelo trazadas contra un factor de estado y proporcionar información estadística adicional sobre las variaciones o los datos ajustados al factor. Por lo tanto, la efectividad relativa está indicada por la pendiente (tasa de cambio) de la ecuación de regresión y el coeficiente de correlación.

Cualquier segmento de la curva original de Jenny (1961) se puede aproximar utilizando la ecuación básica para expresar la regresión lineal (Richardson y Edmonds, 1987):

$$Y = a + bX \qquad (3)$$

donde, Y es la variable dependiente, X es la variable independiente; a es la intersección del eje Y, y b es el coeficiente de regresión (pendiente). Los valores de la variable independiente (X) se asignan al factor de estado y son equivalentes a F en la ecuación (2) de Jenny, lo que implica variables independientes. La variable dependiente (Y), o N en la ecuación (2), representa los valores predichos determinados a partir de la propiedad del suelo observada.

En el caso del factor clima, se tienen subfactores como la temperatura y la humedad. En algunos casos, es difícil determinar el papel que juegan estas variables por separado; para ello es necesario realizar la combinación de los subfactores en función del factor de estado del clima por medio de técnicas matemáticas (Jenny, 1941). La manera de realizar las relaciones cuantitativas con la combinación de los subfactores es mediante el análisis multivariado utilizando la ecuación de regresión múltiple:

$$Y = \beta_o + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_n X_n \qquad (4)$$

donde Y es la variable dependiente, X_1, X_2 … X_n son las variables independientes, manteniendo fijos o constante el resto de predictores; βo es la intersección del eje Y, y β_1, β_1 … β_n son coeficientes de regresión. Los valores de las variables independientes (X_1, X_2 … X_n) se asignan a los subfactores de estado. La variable dependiente (Y), representa los valores predichos determinados a partir de la propiedad del suelo observada.

Las funciones de combinación entre factores de estados son posibles, aunque poco comunes, por ejemplo, una topolítica: S = f (relieve, material parental) cl, o, t … (Schaetzl y Anderson, 2005). Para hacerlo, el investigador examina rutinariamente un grupo de suelos en los cuales cuatro (o tres) de los factores del estado se mantienen constantes, y permite que uno (o dos) varíen.

El modelo funcional-factorial propuesto por Jenny se ha utilizado muchas veces para examinar las climosecuencias, biosecuencias, toposecuencias, litosecuencias y cronosecuencias.

1.9.1 Factor Tiempo (t)

El factor tiempo es la secuencia más común de las derivadas de la ecuación del factor de estado, conocida como cronosecuencia (Schaetzl y Anderson, 2005). En una secuencia cronológica, se examinan una serie de suelos de diferentes edades, que proporcionan información valiosa sobre el desarrollo del suelo. Durante la formación del suelo, las adiciones y las pérdidas de material alteran la distribución en el perfil del suelo.

Las cronosecuencias registran intervalos cortos de la historia geológica de una región o localidad. El material rocoso se expone en superficie, cada vez que un glaciar se retira o deja a su paso los depósitos glaciares, cada vez que se genera un movimiento en masa, que se acumula un coluvión en la vertiente o ladera, cada vez que un volcán entra en erupción dejando cenizas volcánicas o flujos de lava en la superficie, cuando se forma una duna de arena por acción del viento o se drena un lago. Cada uno de estos eventos marca el "tiempo cero" y el estado inicial para la formación del suelo, con un material parental (p) y un relieve (r) de referencia. Otros estados iniciales pueden pertenecer a un campo arado, una cicatriz de erosión o cualquier sitio que deseemos elegir como punto de partida de la génesis del suelo (Jenny, 1980).

1.9.2 Factor Material Parental (p)

El material parental del suelo está compuesto por aquellos materiales que le dan origen, ya sean los productos de la alteración de las rocas, los saprolitos o los sedimentos no consolidados de cualquier procedencia y composición o los depósitos orgánicos (Zapata, 2006). Cuando el material de origen se expone al ambiente del sitio, los procesos pedogénicos comienzan a actuar, y se podrán identificar las alteraciones y estructuras generadas por la pedogénesis.

1.9.3 Factor Relieve (r)

Se considera relieve al conjunto de geoformas o configuración física que se presentan en la superficie terrestre, especialmente la altitud, las pendientes y las curvaturas del terreno. El relieve es un “objeto” dinámico e histórico, que se ha venido formando por una sucesión de procesos destructivos y constructivos a través del tiempo. Las designaciones comunes empleadas en la pedología son: superficies planas, superficies onduladas, valles, colinas y montañas. En los atributos cuantitativos del relieve se pueden incluir la

elevación sobre un punto de referencia, la pendiente del terreno y el estado natural de drenaje, la orientación de la vertiente o ladera(aspect) y la curvatura de las vertientes que permite diferenciar segmentos de vertiente convexos, cóncavos y rectílineos (Buol et al., 2011).

Según Schaetzl y Anderson (2005) el relieve tiene la función muy importante de proporcionar energía cinética y potencial al sistema del suelo a través de su impacto en el movimiento del agua. Eso "condiciona" la redistribución de materia y energía dentro del sistema de paisaje del suelo. Estas influencias se denominan toposecuencias o catenas, que enfatizan el impacto del relieve.

1.9.4 Factor Organismos (o)

Las especies de plantas (flora) y animales (fauna) constituyen el factor interno y externo en la formación del suelo (Buol et al., 2011). Las enormes cantidades de energía que moviliza la fotosíntesis, la descomposición de la materia orgánica y la actividad de los microorganismos, son parte fundamental de los procesos pedogenéticos, generadores de reorganización de materiales y pueden ayudar a la formación de estructura secretando diversos compuestos mucilaginosos (Leighton, 2010).

1.9.5 Factor Clima (cl)

Como factor en la génesis del suelo, el clima proporciona dos de los componentes más importantes que controlan los procesos de formación del suelo: el agua y la temperatura (energía) (Buol et al., 2011). Cuando se realiza el análisis del clima a nivel regional, tanto la precipitación y la temperatura no son interdependientes, pueden tratarse como funciones o subfactores separadas (Birkeland, 1984).

1.10 Parámetros morfométricos del relieve

La morfometría del relieve trata de la geometría del paisaje (Chorley et al., 1957), que intenta describir cuantitativamente la forma de la superficie terrestre (Hengl y Reuter 2009), siendo una subdisciplina de la geomorfología (Mark, 1975). A continuación, se describen los parámetros morfométricos más importantes:

1.10.1 Pendiente del terreno

Es el ángulo de la mayor inclinación de la vertiente o ladera. Según Evans, Zevenbergen y Thorne, citado por Loro (2015), la pendiente refleja la tasa de mayor cambio entre los valores de elevación. El valor se puede calcular en grados, porcentajes o radianes. Las pendientes suaves pueden promover una mayor productividad de las plantas por las acumulaciones intermitentes de sedimentos superficiales y disponibilidad de agua y sean mucho más ricos en materia orgánica que en pendientes muy inclinadas (Schaetzl, 2013; Jenny, 1980).

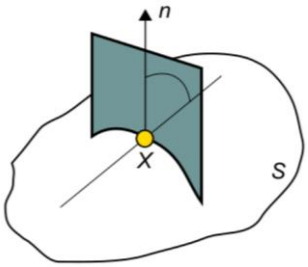
1.10.2 Orientación de la vertiente (aspect)

La orientación de la vertiente o ladera es una variable circular, corresponde a la dirección o azimut de la gradiente máxima. Los suelos, la vegetación y el manejo de ambos son sensibles a esta variable, especialmente hacia las latitudes medias y altas del planeta (Jenny, 1980).

1.10.3 Curvatura del terreno

Loro (2015) menciona que la curvatura viene definida por la curva formada por un plano ortogonal a la superficie analizada. En función de cómo giremos el plano ortogonal en torno al vector n, se pueden obtener diferentes curvas. En general, todas las curvaturas se miden en radianes/m o radianes/100 m (Figura 1-5).

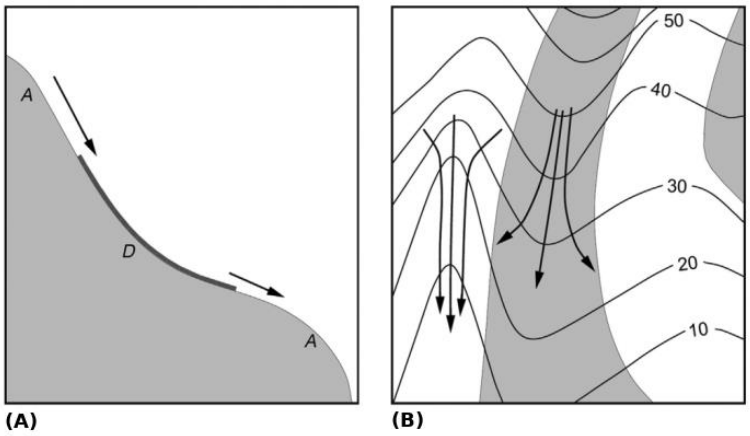
Figura 1-5: Un plano ortogonal a la superficie S en el punto X da como resultado una curva de la intersección (Olaya, 2014).



Para definir la forma de una superficie se emplean dos perfiles ortogonales: uno en el sentido de la máxima inclinación de la superficie y otro en sentido de la dirección de la

superficie. La curvatura de perfil, es la curvatura de una sección que tiene una línea tangente común con una pendiente (la dirección de la máxima gradiente) en un punto determinado de la superficie del terreno. Esta curvatura mide la tasa de cambio de la pendiente, por lo que es importante para caracterizar los cambios en la velocidad del flujo y los procesos de transporte de las partículas (Figura 1-6A) y la curvatura plana, es la curvatura de una línea de curvas de nivel en un punto determinado de la superficie del terreno. Esta curvatura mide la convergencia y la divergencia del flujo de distribución de agua superficial y de las partículas sólidas a través de la dirección de la pendiente (Figura 1-6B) (Florinsky, 2016).

Figura 1-6: Dos mecanismos de acumulación de flujos impulsados por la gravedad: (A) Vista de perfil. Desaceleración/aceleración relativa del flujo: el flujo desacelera (áreas de desaceleración relativa, D) y acelera (áreas de aceleración relativa, A). (B) Vista en planta. Flujo de convergencia o denudación/divergencia o acumulación: las líneas de flujo convergen (áreas de convergencia, blanco) y divergen (áreas de divergencia, gris) (Florinsky, 2016).



1.10.4 Índice Topográfico de humedad (ITH)

Este parámetro describe la tendencia de una celda a acumular agua (Hengl y Reuter, 2009). Definida por la siguiente ecuación:

$$ITH = ln\left[\frac{AC}{\beta}\right] \qquad (5)$$

El Índice Topográfico de Humedad es el logaritmo de la relación del área de acumulación (AC) y la tangente de β en un punto determinado de la superficie terrestre. Siendo la tendencia simultánea de dos factores: La acumulación del agua en la vertiente o ladera y la tasa de movimiento de agua en la vertiente. Estos factores permiten diferenciar cuatro zonas con características contrastantes, a saber:

- Zona 1: Zonas de confluencia con abundante humedad y de persistencia de ella, debido a pendientes suaves.
- Zona 2: Zonas de confluencia con abundante humedad, pero de evacuación rápida debido a pendientes moderadas o fuertes.
- Zona 3: Zonas deficitarias en humedad y de pendientes pronunciadas.
- Zona 4: Zonas deficitarias en humedad y de pendientes suaves.

Estas características confieren un buen indicador de la distribución de la humedad del suelo en diferentes posiciones del paisaje, por lo tanto, puede mostrar una relación significativa con la distribución de MOS y el espesor del primer horizonte del suelo (Pei et al., 2010).

2. Capítulo 2: Comparación del carbono orgánico proveniente de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos y el grado de humificación de los ácidos húmicos de cinco órdenes de suelos

Resumen

La materia orgánica del suelo (MOS) es el componente más complejo y menos comprendido en la Ciencia del Suelo. A pesar que vienen siendo ampliamente estudiadas las fracciones húmicas resultan aún imposible dilucidar exactamente la estructura debido a su complejidad y no contar con una metodología sólida de análisis. En este estudio se realiza la comparación del contenido de carbono orgánico (CO) en las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y los ácidos fúlvicos (AF) en cinco órdenes de suelos (Aridisol, Entisol, Histosol, Inceptisol y Mollisol) y posteriormente se realizó la asociación del grado de humificación con los tipos de suelos. El grado de humificación se determinó por el método Nagoya propuesto por Kumada (1987). La cuantificación del carbono orgánico se determinó por el método Walkley y Black (1934). Los resultados son: el contenido promedio de carbono orgánico de los AH del orden Aridisol difiere del de los Histosoles, Inceptisoles y Mollisoles. El orden Entisol presentó diferencias con los Histosoles y Mollisoles, los suelos del orden Inceptisol presentaron diferencias con los Aridisoles e Histosoles y los del orden Histosol se diferenciaron de los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles. De la misma forma, los del orden Mollisol difirieron con los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles. En la fracción de los AF el contenido promedio de carbono orgánico del orden Aridisol difirió del encontrado en los Histosoles, Inceptisoles y Mollisoles. El orden Entisol se diferenció de los Mollisoles; así mismo, el orden Inceptisol difirió de los Aridisoles y Mollisoles y el orden Histosol se diferenció de los Aridisoles. Por último, el orden Mollisol se diferenció también de los Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles.

Los tipos de suelo según el presente estudio, no están asociados o no muestran patrones de humificación, lo cual puede deberse a que las distinciones que se hacen al clasificar los mismos, no se basan en los procesos pedogenéticos y éstos presentan una amplia gama de características en los horizontes superficiales; además se desarrollan en un rango amplio de climas, biota, relieve y material parental en un tiempo transcurrido.

Palabras clave: Fragmentación, humificación, patrones, procesos, tipos de suelos.

2.1 Introducción

La MOS comprende una mezcla de residuos de plantas, microbios y animales en diversas etapas de descomposición y sustancias orgánicas heterogéneas estrechamente asociados a la fracción mineral (Kononova, 1975; Christensen, 1992; Zaccone, 2018; Osorio, 2018; Gallardo, 2016). Según Kononova (1966) este proceso complejo involucra dos grupos: 1. La descomposición de los componentes originales de los tejidos y su conversión por microorganismos en compuestos químicos más simples identificables por la química orgánica (proteínas y aminoácidos, hidratos de carbono simple y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros) y parcialmente en productos de completa mineralización (producción de CO_2 por respiración, NO_2, NO_3, NH_3, CH_4, H_2O y otros). 2. La síntesis de compuestos orgánicos con la formación de sustancias húmicas de alto peso molecular. A este conjunto de procesos se les denomina humificación y producen una mezcla de sustancias que tienen alta resistencia al posterior ataque microbiano y son completamente diferentes a cualquier sustancia vegetal o animal (Duchaufour, 1987). De esta manera, el contenido de carbono orgánico en los suelos (COS) es el componente de la MOS.

En La Tierra, el contenido de COS de los horizontes superiores de los suelos (epipedones) contienen entre 1200 a 1500 Pg de C (1 Pg = 10^{15} g = 10^{12} kg = 10^{9} t) (Gallardo y Merino, 2007). Aunque el carbono orgánico de las sustancias húmicas o humus representa del 60 al 80% del COS (Piccolo et al., 2018; Ismail-Meyer, 2018).

Kumada (1987) fue capaz de obtener información de las moléculas de los AH, tales como: grupos funcionales, composición elemental y grado de humificación. Para el grado de humificación, propone distinguir cuatro tipos de ácidos húmicos A, B, Rp y P. Esto se puede conocer a través de la formación de los ácidos húmicos, en la que el inicio del

proceso de humificación empieza con el tipo Rp (primeros estados de humificación de la materia orgánica), evolucionando al tipo B y finalmente al tipo A (cada tipo exhibe una forma relativamente estable). En suelos fuertemente ácidos, el tipo Rp puede reemplazarse por los de tipo P.

El componente de color marrón a negro (sustancias húmicas) hace referencia a los ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (HM) que representan el reservorio de carbono orgánico más recalcitrante y estable desde el punto de vista microbiano (El-Metwally et al., 2014; Duchaufour, 1987).

El humus o las sustancias húmicas son el producto del proceso pedogenético (Simonson, 1959; Fanning y Fanning, 1989; Zapata, 2001, 2006, 2014; Buol et al., 2011). Un cambio leve en la reserva recalcitrante de carbono orgánico del suelo tendrá un gran impacto en la concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (Li et al., 2019).

El objetivo de esta investigación fue comparar la composición del contenido de carbono orgánico en las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y los ácidos fúlvicos (AF). Además, conocer si el grado de humificación (A, B, P y Rp) en los suelos guarda relación con los órdenes de suelos (Aridisol, Entisol, Histosol, Inceptisol y Mollisol).

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el distrito de San Rafael de la provincia de Ambo, ubicado en el departamento de Huánuco, Perú. Esta área abarca una extensión de 44189.73 ha., localizadas entre las coordenadas: extremo inferior-derecho es de 10°27’41.83’’ S y 76°1’32.14’’ O; y la del extremo superior-izquierdo es de 10°12’17.43’’ S y 76°15’16.33’’ O (Figura 2-1). Las 42 muestras simples se analizaron en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

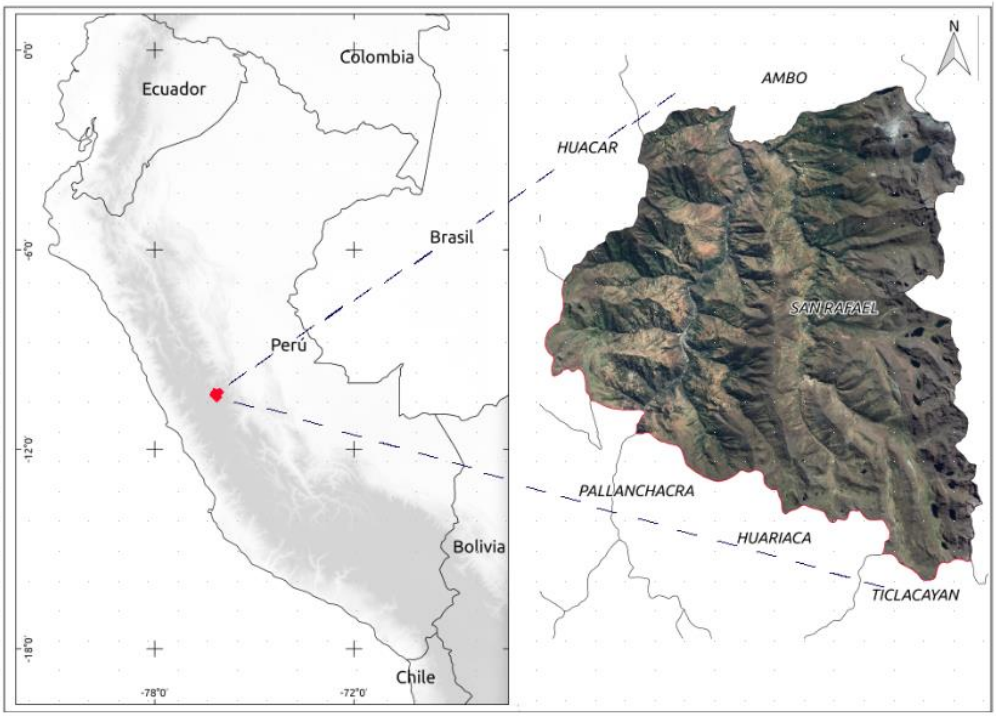
La zona de estudio está situada entre 2100 y 4890 m.s.n.m. La temperatura media mensual del aire en la zona baja y media (2100 a 3500 msnm) oscila entre 12° a 20°C,

en las zonas altas (3500 a 4200 msnm) oscila entre 8° a 16°C, y en las zonas superiores a 4200 msnm la temperatura oscila de 4° a 10°C (MINAGRI, 2016).

Los suelos fueron clasificados según las Claves para laTaxonomía de Suelo (Soil Survey Staff, 2014). En el distrito de San Rafael se identificaron los órdenes de Aridisol, Entisol, Histosol, Inceptisol y Mollisol (Figura 2-2). Estos suelos se desarrollaron a partir de perfiles de meteorización con evolución muy variable, desde incipientes a evolucionados, formados a partir de rocas sedimentarias (areniscas, lutitas, calizas y conglomerados), rocas metamórficas (esquistos), rocas plutónicas (diorita) y a partir de depósitos de materiales aluviales, coluviales y glaciaricos.

El distrito presenta un relieve montañoso de vertientes o laderas largas e inclinadas con valles estrechos que presentan fondos planos de acumulación.

Figura 2-1: Ubicación del área de investigación.



2.2.2 Muestreo

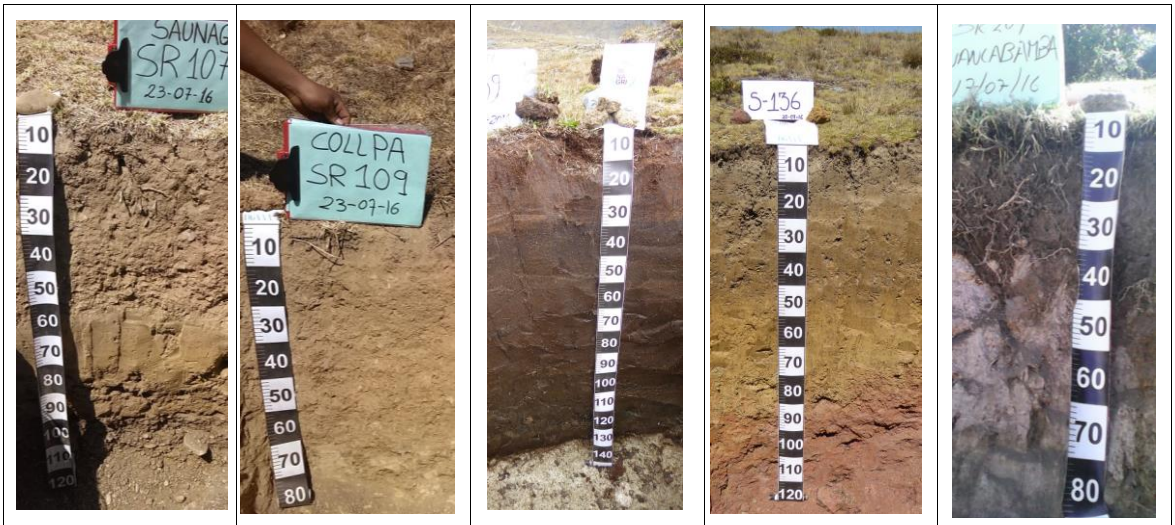
Se colectaron 42 muestras simples en los diferentes órdenes de suelos (Tabla 2-1). Los puntos de muestreo se distribuyeron de un modo aleatorio apoyados en los resultados previos de materia orgánica del suelo. Las muestras se tomaron del primer horizonte, se describieron sus características morfológicas y aquellas del relieve circundante, además han sido georreferenciadas con un GPS Navegador.

Tabla 2-1: Ubicación de los puntos muestreados.

Muestra de suelo	Orden del suelo (Soil Survey Staff)	Latitud sur	Longitud oeste
m1	Aridisol	10°17'32.7"	76°9'32.6"
m2		10°16'57.7"	76°9'38.7"
m3		10°17'18.1"	76°9'32.9"
m4		10°17'49.6"	76°9'54.1"
m5	Entisol	10°18'5.6"	76°9'42.4"
m6		10°14'51.9"	76°7'34.9"
m7		10°21'44.3"	76°11'58.8"
m8		10°20'10.3"	76°11'9.8"
m9		10°14'8.7"	76°10'3.7"
m10		10°14'4.7"	76°10'15.7"
m11		10°14'12.8"	76°11'30.4"
m12		10°14'20.3"	76°5'50.2"
m13		10°20'50.7"	76°13'21.9"
m14		10°19'23.8"	76°11'56.5"
m15		10°14'47.1"	76°7'52.3"
m16		10°16'3.0"	76°7'40.6"
m17		10°18'11.9"	76°6'49.9"
m18	Histosol	10°14'26.9"	76°5'31.5"
m19		10°14'34.9"	76°5'20.0"
m20		10°18'44.6"	76°14'33.4"
m21		10°19'49.5"	76°3'2.7"
m22		10°19'50.3"	76°2'30.9"
m23		10°20'1.1"	76°4'38.6"
m24	Inceptisol	10°15'14.8"	76°9'19.9"
m25		10°18'26.4"	76°9'52.8"
m26		10°13'33.0"	76°6'37.8"
m27		10°19'1.1"	76°11'21.3"
m28		10°15'25.4"	76°7'39.9"
m29		10°14'19.8"	76°6'18.4"
m30		10°14'36.7"	76°6'46.8"

Muestra de suelo	Orden del suelo (Soil Survey Staff)	Latitud sur	Longitud oeste
m31		10°18'10.4"	76°6'53.1"
m32		10°21'32.9"	76°13'7.7"
m33		10°20'24.1"	76°7'22.6"
m34		10°21'36.4"	76°6'56.9"
m35		10°23'0.5"	76°4'50.1"
m36		10°23'15.7"	76°6'48.3"
m37		10°20'49.6"	76°13'57.8"
m38		10°20'59.3"	76°14'43.3"
m39	Mollisol	10°19'47.3"	76°15'11.4"
m40		10°19'21.7"	76°14'48.8"
m41		10°19'31.4"	76°14'42.0"
m42		10°19'45.7"	76°14'40.2"

Figura 2-2: Órdenes de suelos en el distrito de San Rafael.



Aridisol	Entisol	Histosol	Inceptisol	Mollisol

2.2.3 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

La extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo se realizó por el método Nagoya, descrito por Kumada (1987). Las muestras de suelos se secaron al aire libre y se tamizaron. El fraccionamiento de la MOS se realizó mediante la extracción mixta con dos soluciones básicas al 0.1N de NaOH + 0.1M $Na_2P_2O_7.10H_2O$ (relación suelo a extractante, 1:300, p/v), esta relación depende del contenido de carbono orgánico en el

suelo. Seguidamente se hierve (100°C) durante 30min. agitando el Erlenmeyer varias veces. Después de hervir se añade 1g de Na_2SO_4 como agente coagulante, luego de enfriar en baño de agua más hielo, se centrifugó a 11,000 rpm por 15min.

Seguidamente se decantó el extracto alcalino y se volvió a lavar el residuo del suelo dos veces con 20 ml de agente extractante que contenga Na_2SO_4 por centrifugación, como en el anterior paso.

Una vez combinados el extracto soluble y los lavados, se acidificó el extracto con concentración de H_2SO_4 (1 ml:100 ml) y se dejó reposar durante 30min. Posterior a ello se filtraron los extractos acidificados a través del filtro (Toyo Roshi N° 5C) en un Erlenmeyer volumétrico de 100 ml, después se lava el precipitado con H_2SO_4 (relación, ácido a agua, 1 ml:100 ml) y se completa el volumen filtrado (AF) a 100 ml. El AH precipitado (en el papel filtro) se disuelve con 0.1N NaOH, se recoge la solución en un Erlenmeyer de 100 o 250 ml de volumen (según el contenido de AH).

2.2.4 Caracterización química de los ácidos húmicos

La caracterización de los ácidos húmicos se realizó según Kumada (1987). Este sistema agrupa los AH en cuatro tipos: A, B, P y Rp, según su posición en el diagrama de ejes ortogonales cuyas coordenadas corresponden a los parámetros RF y Δlog K. Estos parámetros se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$\Delta log\ K = log\ K_{400} - log\ K_{600}$$

$$RF = K_{600} \times 1{,}000/c$$

Donde:

log K_{400} y log K_{600} es la densidad óptica de una solución de AH a 400 y 600nm., ambos rangos de espectro se obtienen con un Espectrofotómetro Visible GENESYS™ 20.
c = volumen en ml de 0.1N de $KMnO_4$ consumido por 30 ml de solución de AH utilizada para determinar el espectro de absorción. En esta investigación el $KMnO_4$ se reemplazó por 0.1N de $K_2Cr_2O_7$.

El proceso de humificación empieza con el tipo Rp (primeros estados de humificación de la materia orgánica), evolucionando al tipo B y finalmente al tipo A (cada tipo exhibe una

forma relativamente estable). En suelos fuertemente ácidos, el tipo Rp puede reemplazarse por los de tipo P.

2.2.5 Cuantificación del carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico (CO) en los ácidos húmicos y fúlvicos se determinó mediante combustión húmeda por el método Walkley y Black (1934). Las formas orgánicas de C del suelo se oxidan en presencia de exceso de dicromato en medio de un ácido fuerte. Después de la etapa de oxidación del C, a la temperatura de reacción durante un periodo determinado de tiempo, el Cr^{+6} no reducido, adicionado en exceso fue valorado con sulfato ferroso Fe^{+2}. La diferencia entre estos dos estados de oxidación del Cr es igual al contenido de carbono orgánico de la muestra (Allison et al., 1965; Walkley, 1947).

2.2.6 Análisis estadístico

Los resultados de carbono orgánico en los AH y AF se determinaron mediante el análisis de comparación de medias con la prueba de *t* Student. Para conocer las diferencias de predominancia del grado de humificación en los suelos se calculó mediante la prueba de independencia chi-cuadrado de Pearson. En estas pruebas se empleó un nivel de significancia de ($p < 0.05$).

2.3 Resultados y discusión

Los resultados de la cuantificación del carbono orgánico de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF), y la determinación del grado de humificación en cinco órdenes de suelos, se resume en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Contenido de carbono orgánico proveniente de los ácidos húmicos y fúlvicos, y el grado de humificación en diferentes órdenes de suelos.

Muestra de suelo	Orden del suelo (Soil Survey Staff)	Carbono orgánico en los AH	Carbono orgánico en los AF	RF	∆log K	Tipo de AH
		(g 100g^{-1})	(g 100g^{-1})			
m1	Aridisol	0.05	0.05	75	0.57	B
m2		0.15	0.10	23	0.67	P

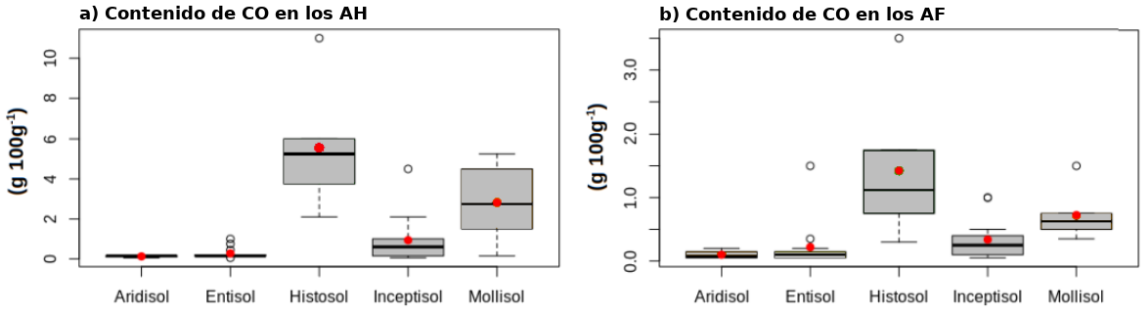
Muestra de suelo	Orden del suelo (Soil Survey Staff)	Carbono orgánico en los AH (g 100g^{-1})	Carbono orgánico en los AF (g 100g^{-1})	RF	∆log K	Tipo de AH
m3		0.15	0.05	57	0.68	B
m4		0.15	0.20	34	0.56	P
m5	Entisol	0.15	0.15	42	0.64	P
m6		0.20	0.35	60	0.67	B
m7		0.10	0.05	45	0.55	P
m8		0.15	0.05	26	0.65	P
m9		0.15	0.10	41	0.66	P
m10		0.05	0.05	62	0.55	P
m11		0.10	0.05	70	0.63	B
m12		1.00	1.50	53	0.45	P
m13		0.15	0.05	28	0.70	P
m14		0.15	0.10	66	0.54	P
m15		0.75	0.10	18	0.55	P
m16		0.15	0.10	61	0.62	B
m17		0.45	0.20	24	0.61	P
m18	Histosol	6.00	1.75	29	0.55	P
m19		3.75	1.25	20	0.54	P
m20		2.10	0.30	26	0.57	P
m21		11.00	3.50	10	0.96	Rp(2)
m22		5.25	1.00	29	0.51	P
m23		5.25	0.75	23	0.50	P
m24	Inceptisol	0.20	0.20	35	0.63	P
m25		0.15	0.30	73	0.69	P
m26		1.20	0.10	15	0.58	P
m27		0.05	0.05	17	0.63	P
m28		0.90	0.25	17	0.57	P
m29		0.25	0.30	80	0.58	B
m30		2.10	0.50	26	0.59	P
m31		0.15	0.20	123	0.62	A
m32		0.15	0.05	77	0.56	B
m33		0.60	0.05	20	0.62	P
m34		0.90	0.40	29	0.53	P
m35		1.00	1.00	76	0.52	P
m36		4.50	1.00	23	0.62	P
m37	Mollisol	0.15	0.35	104	0.64	A
m38		2.50	0.75	27	0.53	P
m39		4.50	0.50	13	0.57	P
m40		1.50	0.50	51	0.50	P
m41		3.00	0.75	20	0.54	P
m42		5.25	1.50	29	0.50	P

2.3.1 Comparación del contenido de carbono orgánico de los AH y AF en los suelos

La dispersión o la variabilidad del contenido de carbono orgánico en las fracciones de los AH y AF en los suelos estudiados se presentan en los diagramas de cajas o boxplot (Figura 2-3). En la fracción de los AH (Fig. 2-3a), el orden Histosol y Mollisol muestra mayor dispersión de los valores, mientras en la fracción de los AF (Figura 2-3b), el orden Histosol presenta mayor dispersión. Los suelos del orden Mollisol presentan un horizonte oscuro (Epipedón) y sin subhorizonte de diagnóstico (Endopedón) expresadas en un perfil de tipo Ap/AC/C situados en las vertientes o laderas de montaña, mientras que el orden Histosol presenta un Epipedón hístico que se expresa con horizontes superficiales altamente descompuestos y con regímenes de humedad ústico, údico y ácuico; desarrollados a partir de depósitos morrénicos, rocas metamórficas, rocas plutónicas y materiales orgánicos. Ambos suelos se localizan en contextos muy diversos que incluyen las zonas de vida de páramo muy húmedo y páramo pluvial (MINAGRI, 2016).

Según el Soil Survey Staff (1999) cada orden se diferencia por la presencia o ausencia de horizontes de diagnósticos o características que reflejen los procesos de formación, siendo así muy heterogéneo con respecto a las propiedades. Por lo tanto, el contenido de materia orgánica y naturaleza de los suelos es altamente variable (Stevenson, 1994; Lindsay, 1979; Spain et al., 1983).

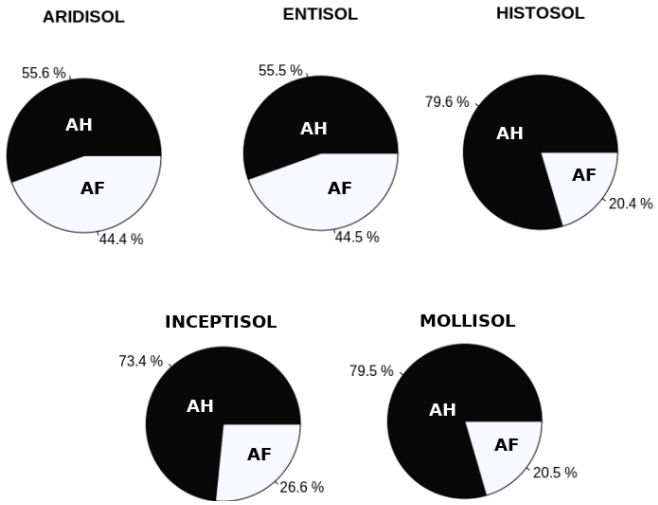
Figura 2-3: Diagramas de caja de contenido de carbono proveniente de los ácidos húmicos (a) y ácidos fúlvicos (b) en cinco órdenes de suelos.



El contenido promedio de CO en los AH en los suelos del orden Aridisol es 0.13g $100g^{-1}$, en Entisol 0.27g $100g^{-1}$, en Histosol 5.56g $100g^{-1}$, en Inceptisol 0.93g $100g^{-1}$ y en Mollisol es de 2.82g $100g^{-1}$. El contenido promedio de CO en los AF es ligeramente menor

respecto al de los AH (Figura 2-4). El orden Aridisol es 0.10g $100g^{-1}$, en Entisol 0.22g $100g^{-1}$, en Histosol 1.43g $100g^{-1}$, en Inceptisol 0.34g $100g^{-1}$ y en Mollisol es de 0.73g $100g^{-1}$. En estudios previos, realizados por varios autores se ha enfatizado que los suelos de praderas (Mollisol) y las turbas (Histosol), tienen contenidos mayores de AH respecto a los contenidos de AF (Kononova, 1966; Gallardo, 2016). Además, Stevenson (1994) y Zamboni et al. (2006) encontraron que los suelos del orden Mollisol presentan contenidos altos de AH que los otros tipos de suelos. En el Perú, León (2016) reporta mayor contenido de carbono orgánico en las sustancias húmicas en seis suelos de bofedal (Histosol) ubicados en los departamentos de Ancash, Huancavelica, Arequipa y Puno. El contenido alto de CO en los suelos no garantiza la calidad de humus o materia orgánica del suelo.

Figura 2-4: Distribución de las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF).



Al realizar las comparaciones del contenido de CO en las fracciones de los AH y AF (Tabla 2-3 y Tabla 2-4), los suelos del orden Aridisol y Entisol no presentan diferencia significativa. Los suelos del orden Aridisol no tienen agua disponible durante la mayor parte del tiempo por lo que son lo suficientemente cálidos (Soil Survey Staff, 1999, 2014; Buol et al., 2011; Jaramillo, 2014), estos suelos presentan un epipedón ócrico y están

situados en la zona de vida de estepa espinosa – Montano bajo tropical (ee-MBT) y la evapotranspiración sobrepasa a las precipitaciones durante la mayor parte del año (MINAGRI, 2016). Generalmente, en estos suelos, las poblaciones microbianas son escasas, debido a las cantidades limitadas de agua disponible en el perfil de suelo, las reacciones son relativamente menos intensas (Buol et al., 2011). Los suelos del orden Entisol pueden presentarse en una amplia diversidad de climas, en vertientes de inclinación muy variable, algunas de ellas muy pronunciadas y asociadas con coberturas vegetales naturales muy diversas. La ausencia de rasgos característicos de los distintos procesos pedogenéticos se expresa en estos suelos (Soil Survey Staff, 1999) y presenta un Epipedón ócrico (MINAGRI, 2016). Estas condiciones de variabilidad, pueden influir en el contenido de carbono orgánico, así, presentando contenidos mínimos de carbono en las fracciones de los AH y AF. Mientras que el orden Aridisol presenta diferencias con los órdenes de Histosol, Inceptisol y Mollisol.

Los contenidos de la fracción de los AH en los órdenes Entisol e Inceptisol son similares. Esto puede responder a que ambos órdenes presentan una amplia gama de características como uno o más horizontes pedogenéticos y se desarrollan en un rango amplio de climas (Soil Survey Staff, 1999).

Tabla 2-3: Comparación de medias del carbono orgánico en los ácidos húmicos (AH), en los cinco órdenes de suelos.

	Entisol	**Histosol**	**Inceptisol**	**Mollisol**
Aridisol	p 0.09 ns	p 0.01 *	p 0.03 *	p 0.02 *
Entisol		p 0.01 *	p 0.08 ns	p 0.02 *
Histosol			p 0.01 *	p 0.08 ns
Inceptisol				p 0.02 *

ns: No significativo
* $p < 0.05$

Tabla 2-4: Comparación de medias del carbono orgánico en los ácidos fúlvicos (AF), en los cinco órdenes de suelos

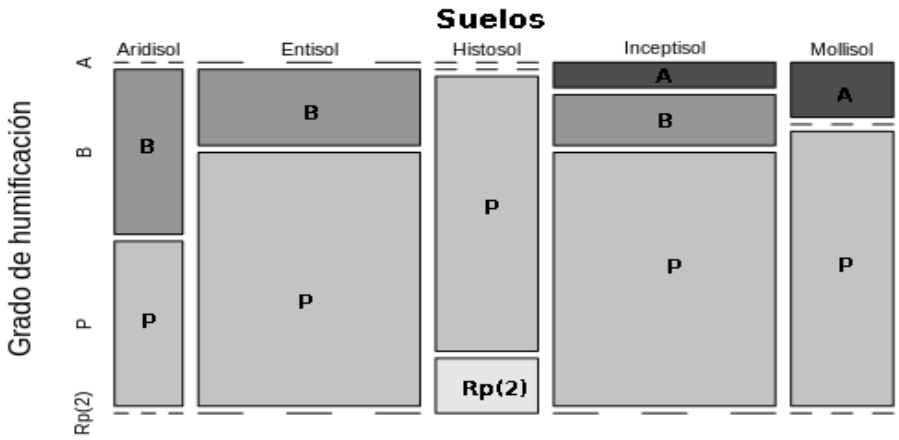
	Entisol	Histosol	Inceptisol	Mollisol
Aridisol	p 0.32 ns	p 0.03 *	p 0.03 *	p 0.01 *
Entisol		p 0.05 ns	p 0.40 ns	p 0.02 *
Histosol			p 0.06 ns	p 0.20 ns
Inceptisol				p 0.04 *

ns: No significativo
* p < 0.05

2.3.2 Comparación del grado de humificación en los suelos

Según la tabla 2-2 y Figura 2-5, dos muestras de AH son Tipo P y dos muestras de AH son Tipo B provenientes del orden Aridisol, siendo el grado de humificación inmaduro y evolucionando a la forma madura. La forma madura en el Aridisol ocurre en muchas regiones semiáridas, que tienen valores menores de concentración de C, la MOS se encuentra altamente trasformada y es resilente respecto a posibles cambios climáticos (Gallardo, 2016).

Figura 2-5: Distribución del grado de humificación en los diferentes órdenes de suelos.



En el orden Inceptisol, 10 muestras de AH son de Tipo P, dos muestras de AH son de Tipo B y una muestra de AH son de Tipo A, siendo su grado de maduración de estado inmaduro a maduro. Este estado inmaduro a maduro pueda a que coincida con el desarrollo del suelo.

El orden Mollisol está constituido por cinco muestras de AH de Tipo P y una muestra de AH de Tipo A. El grado de humificación corresponde con los estados inmaduro y maduro. El estado inmaduro corresponde a suelos intervenidos antrópicamente, que presentan horizontes superficiales de Ap. El grado de humificación Tipo A se presenta en suelos con horizonte A (suelos en pastizales), sin intervención antrópica. En estos suelos del orden Mollisol, los ácidos húmicos a menudo se conservan durante períodos relativamente largos (>3000 años), ligados a los complejos de arcilla-humus (Tsutsuki et al., 1988; Bockheim, 2014). En estos suelos es posible detectar los ácidos húmicos altamente humificados en los horizontes más externos.

Al realizar la prueba de independencia chi-cuadrado de Pearson, las variables de suelos y grado de humificación son independientes o no están asociados ($p = 0.266$, siendo no significativo).

3. Capítulo 3: Factores morfoclimáticos favorables para la preservación del carbono orgánico humificado en suelos de montaña

Resumen

Las sustancias húmicas (SH) son el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS), producto del proceso pedogenético de humificación. En este estudio, se relacionan los factores morfoclimáticos que condicionan el grado de humificación, el contenido de carbono orgánico de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) de 42 muestras de suelos mediante la ecuación funcional de factores de estado del suelo propuesto por Jenny. El grado de humificación se determinó por el método Nagoya propuesto por Kumada (1987). La cuantificación del carbono orgánico se determinó por el método Walkley y Black (1934). Los parámetros morfométricos del relieve se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) y el parámetro climático del sensor MODIS. Los resultados muestran que el factor relieve condiciona al grado de humificación y el factor clima condiciona al contenido de carbono orgánico de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF).

Palabras clave: Factores de estado, humificación, morfometría, sustancias húmicas.

3.1 Introducción

La materia orgánica del suelo (MOS) es el componente más complejo y menos comprendido de la Ciencia del Suelo. La MOS es una mezcla de residuos de plantas, microbios y animales en diversas etapas de descomposición y sustancias orgánicas heterogéneas estrechamente asociados a la fracción mineral (Kononova, 1975; Christensen, 1992; Zaccone, 2018; Osorio, 2018; Gallardo, 2016).

Según Kumada (1987) la humificación es un conjunto de procesos que transforman la materia orgánica en compuestos que tienen alta capacidad de absorción de la luz visible y unos altos contenidos de grupos orgánicos como carbonilo y carboxilo.

La MOS están compuestos de sustancias húmicas, que son una serie de sustancias de peso molecular relativamente alto que varían desde unos pocos cientos para los ácidos fúlvicos hasta más de 300000 para los ácidos húmicos, presentando un rango de color desde el amarillo hasta el negro, formadas por reacciones de síntesis secundaria (Stevenson, 1994).

El suelo o MOS son el producto de los “factores de estado de formación del suelo” y se expresa mediante la siguiente ecuación funcional (Jenny, 1941, 1980):

$$\text{suelo o MOS} = f(\text{cl, o, r, p, t} \ldots)$$

Estos factores de estado corresponden a: clima (cl), organismos (o), topografía o relieve (r), material parental (p) y el tiempo (t). Los puntos suspensivos en la ecuación indican que, además de los cinco factores mencionados, se pueden incluir otras variables. Estos factores formadores del suelo son variables independientes que definen al sistema suelo. En esta interpretación las propiedades del suelo y el proceso de humificación se convierten en variables dependientes y pueden expresarse en función de factores de estado de formación del suelo.

Los científicos en el área de suelos tienen diversas interpretaciones respecto a la importancia de los factores formadores en relación con el contenido de carbono orgánico y el grado de humificación.

Esta investigación se desarrolló con el fin obtener relaciones cuantitativas que condicionan el contenido del carbono orgánico en los ácidos húmicos (AH), en los ácidos fúlvicos (AF) y grado de humificación con las variables independientes del clima y el relieve.

3.2 Materiales y métodos

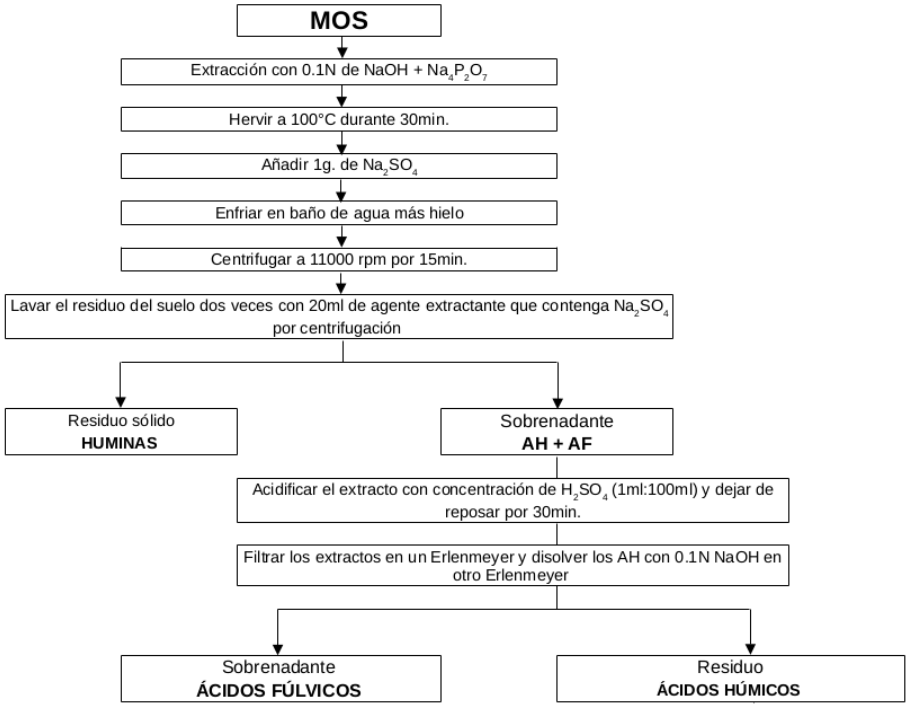
3.2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el distrito de San Rafael de la provincia de Ambo, ubicado en el departamento de Huánuco, Perú. Esta área abarca una extensión de 44189.73 ha., localizadas entre las coordenadas: extremo inferior-derecho es de 10°27'41.83'' S y 76°1'32.14'' O; y la del extremo superior-izquierdo es de 10°12'17.43'' S y 76°15'16.33'' O (Figura 2-1). Las 42 muestras se analizaron en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

3.2.2 Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

La extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo se realizó por el método Nagoya, descrito por Kumada (1987) según el esquema 1.1.

Esquema 3-1: Extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo



3.2.3 Caracterización química de los ácidos húmicos

La caracterización de los ácidos húmicos se realizó según Kumada (1987). Este sistema agrupa los AH en cuatro tipos: A, B, P y Rp, según su posición en el diagrama de ejes ortogonales cuyas coordenadas corresponden a los parámetros RF y Δlog K. Estos parámetros se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$\Delta log\ K = log\ K_{400} - log\ K_{600}$$

$$RF = K_{600} \times 1{,}000/c$$

Donde:

log K_{400} y log K_{600} es la densidad óptica de una solución de AH a 400 y 600nm., ambos rangos de espectro se obtienen con un Espectrofotómetro Visible GENESYS™ 20.
c = volumen en ml de 0.1N de $KMnO_4$ consumido por 30 ml de solución de AH utilizada para determinar el espectro de absorción. En esta investigación el $KMnO_4$ se reemplazó por 0.1N de $K_2Cr_2O_7$.

3.2.4 Cuantificación del carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico (CO) en los ácidos húmicos y fulvicos se determinó mediante combustión húmeda por el método Walkley y Black (1934). Las formas orgánicas de C del suelo se oxidan en presencia de exceso de dicromato en medio de un ácido fuerte. Después de la etapa de oxidación del C, a la temperatura de reacción durante un periodo determinado de tiempo, el Cr^{+6} no reducido, adicionado en exceso fue valorado con sulfato ferroso Fe^{+2}. La diferencia entre estos dos estados de oxidación del Cr es igual al contenido de carbono orgánico de la muestra (Allison et al., 1965; Walkley, 1947).

3.2.5 Obtención de factores morfoclimáticos

Los parámetros morfométricos del relieve se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) del satélite RADARSAT-2. La resolución espacial de 6 metros del MDE fue remuestreada a 30 metros, y se obtuvieron los siguientes parámetros morfométricos: pendiente del terreno, orientación de la vertiente (aspect), curvatura de la vertiente (curvatura de perfil y plana) e Índice Topográfico de Humedad (ITH). Esta extracción de

los parámetros morfométricos del MDE se realizó mediante técnicas de Sistema de Información Geográfica (SIG).

El siguiente factor de estado es el clima. Las variables más importantes son la humedad (h) y la temperatura (t). En esta investigación se trabajó con un solo componente climático, que es la temperatura anual de la superficie terrestre.

El subfactor de temperatura se obtuvo del sensor MODIS. Este producto MODIS (MOD11A2, versión 6) proporciona una temperatura de superficie terrestre (TST) cada 8 días de datos diurnos y nocturnos por píxel a una resolución espacial de 1 km (Wan et al., 2015). Los datos se obtuvieron de EARTHDATA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio-NASA) a partir del año 2008 hasta 2018, y posteriormente se realizó el cálculo de la temperatura anual.

3.2.6 Análisis estadístico

Las relaciones entre los parámetros morfoclimáticos y el grado de humificación se realizó mediante el análisis de regresión logística ordinal. Para conocer la relación de los parámetros morfoclimáticos con el contenido de los AH y AF se empleó la regresión lineal simple y la regresión lineal múltiple. En estas pruebas se empleó un nivel de significancia de ($p < 0.05$).

Para el factor relieve, las relaciones cuantitativas del carbono orgánico de los ácidos húmicos (AH), los ácidos fúlvicos (AF) y el grado de humificación, requieren que se cumpla la siguiente ecuación:

$$CO = f(relieve)\ cl, o, p, t \ldots$$

Todos los factores, excepto el relieve, deben mantenerse constantes.

Para el factor clima, las relaciones cuantitativas del carbono orgánico en el AH, en el AF y grado de humificación, se exige que se cumpla la siguiente ecuación:

$$CO = f(temperatura)\ o, r, p, t \ldots$$

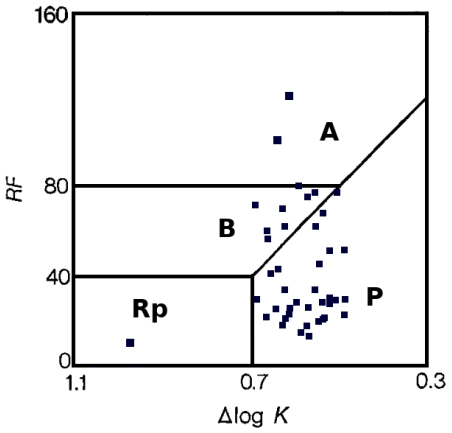
Todos los factores, excepto la temperatura, deben mantenerse constantes.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Grado de humificación

El grado de humificación en los suelos de montaña, muestran la predominancia de los tipos de ácidos húmicos en el siguiente orden: P > B > A > Rp (ver Figura 3-1). Esta codificación de Kumada (1987) propone la teoría para la formación de los AH. El inicio del proceso de humificación empieza con el tipo Rp (primeros estados de humificación de la materia orgánica), evolucionando al tipo B y finalmente al tipo A (cada tipo exhibe una forma relativamente estable). En suelos fuertemente ácidos, el tipo P reemplaza al tipo Rp. Los suelos de montaña del orden Histosol se clasifican como Tipo Rp(2) y Tipo P (primeros estados de humificación), el orden Inceptisol como Tipo P, B y A (estado inmaduro a maduro), el orden Mollisol como Tipo P y A (estado inmaduro y maduro) y los suelos del orden Aridisol y Entisol como Tipo P y B (estado inmaduro y evolucionado a la forma madura).

Figura 3-2: Clasificación de los tipos de ácidos húmicos en suelos de montaña.



3.3.2 Factor de estado que condiciona el proceso de humificación

Al establecer la relación de los factores morfoclimáticos con el grado de humificación, se identificó al factor relieve como el condicionante para que ocurra el proceso de humificación. En el análisis de regresión logística ordinal, solo el parámetro o subfactor de curvatura de perfil de la vertiente presenta una relación significativa ($p < 0.05$), mientras que los subfactores de pendiente, orientación de la vertiente (aspect), curvatura plana, índice topográfico de humedad y la temperatura de la superficie del terreno no presentaron una relación significativa.

La curvatura de perfil, mide la tasa de cambio de la pendiente con los cambios en la distancia; este parámetro se relaciona con la velocidad del flujo y los procesos de transporte de las partículas en la vertiente. En las vertientes de las montañas es frecuente encontrar perfiles sigmoidales, es decir, perfiles que constan de un segmento superior convexo, un segmento intermedio de tipo rectilíneo y un segmento inferior cóncavo (Derruau, 1966; Ruhe, 1975). En la figura 3-2, se muestran los segmentos de curvatura de perfil que condicionan el grado de humificación.

Tabla 3-1: Coeficientes entre las variables morfoclimáticas y el grado de humificación (p es el nivel de significancia).

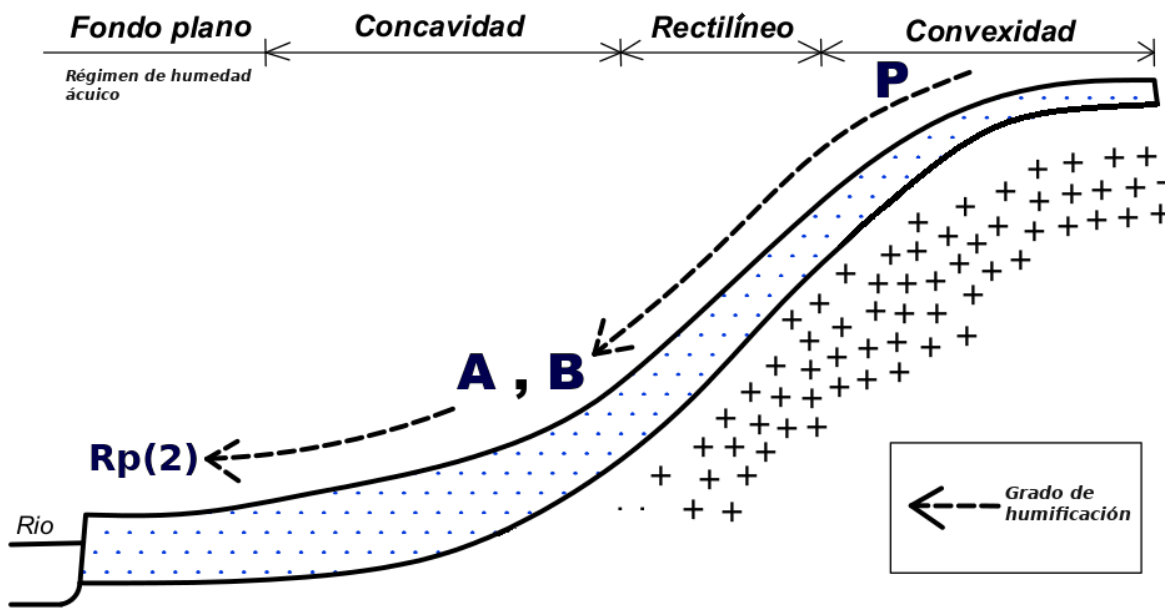
Regresión logística ordinal (factor relieve)		
	Grado de humificación del AH	
	Coeficientes	**p - value**
Pendiente del terreno	0.010	0.71 ns
Orientación de la vertiente (aspect)	0.002	0.45 ns
Curvatura de perfil	0.060	*0.04
Curvatura plana	-0.003	0.82 ns
Índice topográfico de humedad	0.542	0.09 ns

Regresión logística ordinal (factor clima)		
	Grado de humificación del AH	
	Coeficiente	**p - value**
Temperatura de la superficie del terreno	-0.348	0.08 ns

ns: No significativo
* $p < 0.05$

En el segmento convexo, el flujo divergente y la erosión son los procesos dominantes (Hall, 1983; Schaetzl, 2013). En este segmento, el grado de humificación más probable es el Tipo P (estado inmaduro), debido a la poca persistencia del agua en los materiales, a un flujo con mayor velocidad y a la erosión más intensa. Estas condiciones no son favorables al desarrollo y estabilidad del humus.

Figura 3-3: Grado de humificación en la curvatura de perfil de la vertiente.



El segmento rectilíneo ocupa la parte media de la vertiente y se caracteriza por una inclinación muy homogénea en su recorrido. El proceso dominante en esta ubicación es una condición de tránsito, tanto de agua como de materiales, sin que se presentan acumulaciones o remociones significativas de materiales (Schaetzl, 2013). En esta posición el grado de humificación varía del Tipo P, B y A (estado inmaduro a maduro). Esta variabilidad también se presenta en el desarrollo de los horizontes de diagnóstico del suelo (Hall, 1983). El Tipo P se encuentra en la transición al segmento convexo, mientras que los Tipos A y B tienen la probabilidad de encontrarse en la concavidad.

El segmento cóncavo, localizado en la parte inferior de la vertiente actúa como receptor de la depositación de sedimentos y de concentración de las aguas de escorrentía, el flujo subsuperficial y parcialmente del flujo freático. Igualmente, la persistencia de la humedad en los materiales que subyacen a este segmento es mayor que en los segmentos de la parte media y superior (Hall, 1983; Schaetzl, 2013). El grado de humificación es de tipo A y B (corresponde al grado más evolucionado, pero cada tipo exhibe una forma relativamente estable). En esta posición de la vertiente, la materia orgánica aumenta por las condiciones favorables de retención de agua (Hall, 1983).

Finalmente, los fondos planos, ubicados en el Páramo muy húmedo – Subalpino Tropical (pmh-SaT) presentan un régimen de humedad ácuico. En este sector, el grado de humificación es de tipo Rp y corresponde al inicio del proceso de humificación en uno de los suelos del orden Histosol. Estos suelos se desarrollan bajo condiciones de drenaje restringido y saturación hídrica casi continua en el tiempo. La dificultad para la circulación del oxígeno en estas condiciones, evita la descomposición de los restos vegetales y permite así su acumulación como materiales vegetales en diferentes estados de descomposición (Stevenson, 1994; Buol et al., 1990).

3.3.3 Factor de estado que condiciona el contenido de carbono orgánico en los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF)

En la tabla 3-2, puede observarse que la variable temperatura de la superficie terrestre (factor clima) actúa como un factor importante que expresa efectividad en el contenido de carbono orgánico en la fracción de los AH y AF, ya que el coeficiente presenta una pendiente pronunciada. El Índice topográfico de humedad, un índice de carácter morfoclimático, ejerce una baja efectividad en el contenido de carbono orgánico de los ácidos húmicos.

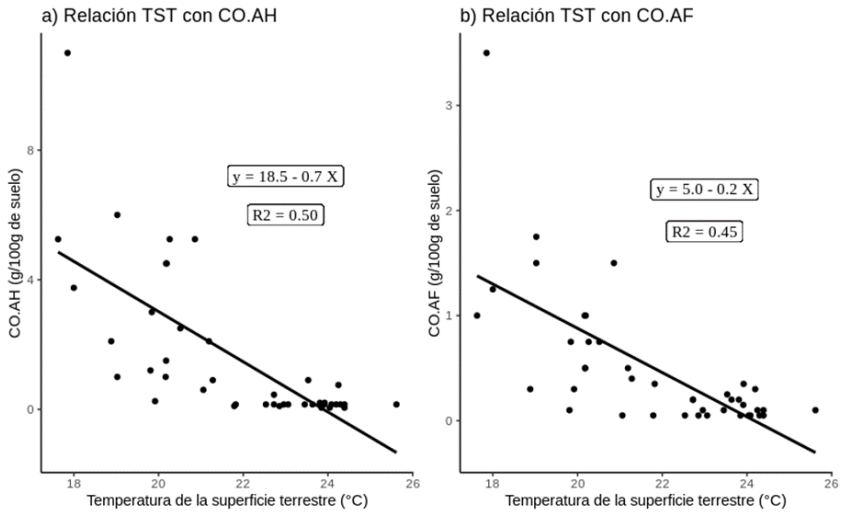
Tabla 3-2: Coeficientes entre las variables morfoclimáticas y contenido de carbono orgánico en los AH y AF (p es el nivel de significancia).

Regresión lineal múltiple (factor relieve)				
	CO en los AH		**CO en los AF**	
	Coeficientes	**p - value**	**Coeficientes**	**p - value**
Intercepto	-0.870		-0.174	
Pendiente del terreno	-0.025	0.24 ns	-0.005	0.39 ns
Orientación de la vertiente (aspect)	0.002	0.33 ns	0	0.41 ns
Curvatura de perfil	0.026	0.32 ns	0	0.97 ns
Curvatura plana	0.010	0.54 ns	0.001	0.69 ns
Índice topográfico de humedad	0.443	0.06 ns	0.109	0.11 ns

Regresión lineal simple (factor clima)				
	Carbono orgánico del AH		**Carbono orgánico del AF**	
	Coeficientes	**p - value**	**Coeficientes**	**p - value**
Intercepto	18.513		5.09	
Temperatura de la superficie del terreno	-0.774	* 1.18×10^{-7}	-0.21	* 5.64×10^{-7}

ns: No significativo
* $p < 0.05$

Figura 3-4: Relación entre la temperatura de la superficie terrestre (TST) y los contenidos de carbono orgánico. a) TST con CO en los ácidos húmicos y b) TST con CO los ácidos fúlvicos.



La figura 3-3 muestra la relación inversa entre la temperatura de la superficie terrestre y el contenido de CO en los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, es decir, un incremento en la temperatura disminuye el contenido de CO en los AH y AF en los diferentes suelos. Jenny et al., (1948) también encontraron una relación inversa entre la materia orgánica y la temperatura en Colombia. En algunos suelos de Venezuela, se encontró que el contenido de carbono orgánico incrementa con la altitud y fue asociada a una disminución de la temperatura, fundamentalmente para las regiones localizadas por encima de los 3000 m.s.n.m (Ochoa et al., 1981).

El CO en las fracciones de AH y AF disminuye a temperaturas mayores a 22°C (Figura 3-3). Estas condiciones de temperaturas muy altas tienen una influencia significativa sobre una máxima mineralización muy por encima de la humificación (Bartholomew y Clark, 1965). Por lo tanto, a temperaturas menores a los 22°C se producen la acumulación de materia orgánica y el incremento de la tasa de humificación.

4. Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

El trabajo realizado, establece la comparación de los contenidos de carbono orgánico en las fracciones de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) y el grado de humificación para cinco órdenes de suelo en la región de San Rafael (Perú). Los resultados más significativos son los siguientes:

- En el orden Aridisol, la baja disponibilidad de agua durante la mayor parte del tiempo y donde la evapotranspiración sobrepasa a las precipitaciones, constituyen condiciones muy desfavorables al desarrollo de poblaciones microbianas abundantes. Por lo tanto, se infiere que se presenten contenidos mínimos de carbono orgánico en las fracciones de los AH y AF y difieren de otros órdenes de suelo.
- Los suelos de los órdenes Entisol e Inceptisol, se presentan en contextos muy diversos respecto de clima, inclinación de las vertientes y tipos de cobertura vegetal, teniendo como rasgo en común, una formación incipiente de horizontes pedogenéticos. Por lo tanto, presentan contenidos mínimos de carbono en las fracciones húmicas.
- En el orden Mollisol, situados bajo una cobertura de pastos que anualmente aportan una gran cantidad de materia orgánica, formando complejos de arcilla-humus, conllevan al desarrollo de ácidos húmicos altamente humificados y contenidos altos de carbono en las fracciones húmicas.
- En el orden Histosol, debido al aporte continuo, acumulación de materia orgánica y climas fríos retrasan el proceso de humifiación. Por lo tanto, presentan contenidos altos de carbono en la fracción húmica e inicio reciente del proceso de humificación.

- Finalmente, el grado de humificación está condicionado por el factor relieve y el contenido de carbono orgánico en los AH y AF está condicionado por el factor clima. Los parámetros morfoclimáticos que ejercen influencia en estas relaciones son la curvatura de perfil de la vertiente y la temperatura de la superficie del terreno.

4.2 Recomendaciones

- Se sugiere realizar la caracterización de la materia orgánica de los suelos a niveles cada vez más bajos de la taxonomía de suelos, con la finalidad de evidenciar la homogeneidad de las sustancias húmicas.
- Para la identificación de la calidad de materia orgánica del suelo se sugiere utilizar otro índice como la relación de HN/(AF + AH) en suelos con fracción mineral y para identificar la evidencia de los grupos funcionales se recomienda utilizar técnicas como Espectroscopía de Infrarrojo de Transformada de Fourier FTIR, también la composición elemental de las sustancias húmicas.
- Realizar las relaciones del contenido de carbono orgánico en las fracciones húmicas y grado de humificación con los cinco factores formadores del suelo (clima, organismos, relieve, material parental y el tiempo), con la finalidad de determinar el orden de importancia de los factores.

Bibliografía

Allison, L. E., Bollen, W. B. and Moodie, C. D. (1965). Total carbon. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, (methodsofsoilanb), 1346-1366.

Bartholomew, W. V., and Clark, F. E. (1965). *Soil nitrogen* (No. 631.41 S683s). American Society of Agronomy, Madison, WI (EUA).

Birkeland, P. W. (1984). Soils and Geomorphology. Oxford Univ. Press, New York.

Bockheim, J.G. (2014). Mollic epipedon. In: *Soil Geography of the USA.* Springer International Publishing, 29 – 46p.

Bravo, I., Martinez, C. y Humberto, E. (2016). Química de la Materia orgánica de andisoles altoandinos en Colombia. Editorial Universidad del Cauca. 1ra ed. Popayan, Colombia. 138p.

Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C. and McDaniel, P.A. (2011). Soil Genesis and Classification. Sixth Edition. John Wiley & Sons, Chichester, 543 p.

Buol, S.W., Hole, F.D. y McCracken, R.J. (1990). Génesis y Clasificación de Suelos. Ed. Trillas. México. 417p.

Chorley, R. J., Malm, D. E., and Pogorzelski, H. A. (1957). A new standard for estimating drainage basin shape. *American Journal of Science*, *255*(2), 138-141.

Christensen, B. T. (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In *Advances in soil science* (pp. 1-90). Springer, New York, NY.

Derruau, M. (1966). Geomorfología. Barcelona: Ediciones Ariel.

Duchaufour, P. (1987). Manual de edafología. Masson, S. A. Barcelona, España.

El-Metwally, M.S., Ahmad A.T., Ahmad A.M. and Moustafa A.E. (2014). Chemical Composition of Humic Substances Extracted From Salt Affected Egyptian Soils. *Life Science Journal.* 1111. 197-206.

Fanning, D.S. and Fanning, M.C.B. (1989). Soil: Morphology, Genesis and Classification. John Wiley andSons Inc., New York, 395 pp.

Florinsky, I.V. (2016). Digital Terrain Analysis in Soil Scince and Geology. Pushchino, Elsevier, Russia.

Gallardo J. F. y Merino A. (2007). El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemasforestales. En: Bravo, F. (Coord.). *El papel de los bosques españoles en lamitigación del cambio climático.* Fundación Gas Natural, Barcelona. 43-64pp.

Gallardo J.F. (2016). La materia orgánica del suelo: Residuos orgánicos, humus, compostaje, captura de carbono. Editorial S.i.F. y Q.A., Salamanca (España).

González, H. (2008). Caracterización de la materia orgánica en algunos suelos representativos de la zona cafetera del departamento de Caldas. Tesis Maestría Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Hall, G. F. (1983). Pedology and geomorphology. In *Developments in Soil Science* (Vol. 11, pp. 117-140). Elsevier.

Hayes, M. H., Mylotte, R. and Swift, R. S. (2017). Humin: its composition and importance in soil organic matter. In *Advances in Agronomy* (Vol. 143, pp. 47-138). Academic Press.

Hengl, T. and Reuter H. I. (Eds). (2009). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications (Developments in Soil Science, vol. 33). Amsterdam: Elsevier.

Ikeya, K., and Watanabe, A. (2003). Direct expression of an index for the degree of humification of humic acids using organic carbon concentration. *Soil science and plant nutrition*, *49*(1), 47-53.

Ismail-Meyer, K., Stolt, M. H., and Lindbo, D. L. (2018). Soil organic matter. In *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths* (pp. 471-512). Elsevier.

Jaramillo, D. F. (2014). El Suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill. New York.

Jenny, H., Bingham, F., and Padilla-Saravia, B. (1948). Nitrogen and organic matter contents of equatorial soils of Colombia, South America. *Soil Science*, *66*(3), 173-186.

Jenny, H. (1958). Role of the plant factor in the pedogenic functions. Ecology 39:5-16.

Jenny, H. (1961). Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. In Soil Science Society of America Proceedings (Vol. 25, No. 5, pp. 385-388).

Jenny, H. (1980). The Soil Resource, Origin and Behavior. Springer, New York.

Katsumi, N., Yonebayashi, K., Okazaki, M., Nishiyama, S., Nishi, T., Hosaka, A., and Watanabe, C. (2016). Characterization of soil organic matter with different degrees of humification using evolved gas analysis-mass spectrometry. *Talanta*, *155*, 28-37.

Kononova, M. M. (1975). Humus of virgin and cultivated soils. In *Soil components* (pp. 475-526). Springer, Berlin, Heidelberg.

Kononova, M.M. (1966). Soil Organic Matter: Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford.

Kumada, K. (1987). Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo.

Leighton, W.L. (2010). Suelos de Chile. Impresos Maval, Santiago, Chile.

León, A.Y. (2016). Reserva de carbono en bofedales y su relación con la florística y condición del pastizal. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

Li, M., Han, X., Du, S., and Li, L. J. (2019). Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China. Catena, 174, 285-292.

Lindsay, W.L. (1979). Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Loro, M. (2015). Modelo para la integración del trazado de infraestructuras lineales en el paisaje y el medio ambiente basado en SIG. Tesis doctoral, Madrid, 227pp.

Mark, D. M. (1975). Geomorphometric parameters: a review and evaluation. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 57(3-4), 165-177.

Ministerio de Agricultura y Riego, MINAGRI. (2016). Levantamiento de Suelos y Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor del Distrito de San Rafael, Provincia de Ambo, Departamento de Huánuco-Perú.

Ochoa, G.R., Malagón C.D. y Pereyra J. (1981). El contenido de materia orgánica, nitrogeno total y factores que los afectan en algunos suelos de Venezuela. *CIDIAT, SC*-44. 9p.

Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Un libro libre de Víctor Olaya. Consultado el 14 de mayo de 2019, disponible en: https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Osorio, N.W. (2018). Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Medellín: Universidad Nacional de Colombia

Pei, T., Qin, C. Z., Zhu, A. X., Yang, L., Luo, M., Li, B., and Zhou, C. (2010). Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators*, *10*(3), 610-619.

Pefferkorn, E. (1997). Structure and stability of natural organic matter/soil complexes and related synthetic and mixed analogues. *Advances in colloid and interface science*, *73*, 127-200.

Piccolo, A., Spaccini, R., Drosos, M., Vinci, G., and Cozzolino, V. (2018). The molecular composition of humus carbon: recalcitrance and reactivity in soils. In The Future of Soil Carbon (pp. 87-124).

Ramesh, T., Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Rao, C. S., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Choudhury, B. U., Wang, H., Tang, C., Wang, X., Song, Z, Freeman, O. W. (2019). Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. In *Advances in Agronomy*.

Richardson, J. L., and Edmonds, W. J. (1987). Linear regression estimations of Jenny's relative effectiveness of state factors equation. *Soil science,* 144(3), 203-208.

Ruhe, R. V. (1975). Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology. Houghton Mifflin, Boston. 246 pp.

Schaetzl R.J. and Anderson S. (2005). Soils: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, Cambridge.

Schaetzl, R.J. (2013). Catenas and soils. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Pope, G.A. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 4, Weathering and Soils Geomorphology, pp. 145–158.

Simonson, R. W. (1959). Outline of a Generalized Theory of Soil Genesis 1. *Soil Science Society of America Journal*, 23(2), 152-156.

Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Soil Survey Staff. (1999). Soil Taxonomy-A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd ed. Agric. Handb. No. 436. USDA-NRCS, Washington, DC.

Spain, A.V., Isbell, R.F. and Probert, M.E. (1983). Organic matter contents of Australian soils, in Soils: An Australian Viewpoint, (CSIRO, Melbourne/Academic Press, London), pp. 551-563.

Stevenson, F. J. (1994). Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Stevenson, F.H., and Olsen, R.A. (1989). A simplified representation of the chemical nature and reaction of soil humus. J.Agron. Educ. 18:84-88.

Stevenson F.J. and Cole M.A. (1999). Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients, 2nd ed. Wiley, New York, USA. 427 pp.

Tan, K.H. (2014). Humic matter in soil and the environment: principles and controversies. CRC Press. 2nd de. Boca Raton.

Tsutsuki, K., Suzuki, C., Kuwatsuka, S., Becker-Heidmann, P., and Scharpenseel, H. W. (1988). Investigation on the stabilization of the humus in mollisols. *Zeitschrift für Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, *151*(2), 87-90.

Vasilevich, R., Lodygin, E., Beznosikov, V., and Abakumov, E. (2018). Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European Northeast Russia as climate change markers. *Science of the Total Environment*, *615*, 1229-1238.

Walkley, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils-effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil science, 63(4), 251-264.

Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science, 37(1), 29-38.

Wan, Z., Hook, S., Hulley, G. (2015). MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MOD11A2.006.

Zaccone, C., Plaza, C., Ciavatta, C., Miano, T. M., and Shotyk, W. (2018). Advances in the determination of humification degree in peat since: Applications in geochemical and paleoenvironmental studies. *Earth-science reviews.*

Zamboni, C., Ingrid, R., Ballesteros, G., María, I., Zamudio, S., and Adriana, M. (2006). Caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos de un Mollisol bajo dos coberturas diferentes. *Revista Colombiana de Química*, *35*(2), 191-203.

Zapata, R. D. (2001). ¿Qué es el humus?, *Revista: Uso de microorganismos en la agricultura, materia orgánica: mito o realidad. X Congreso de la ciencia del suelo*. 155-159.

Zapata, R. D. (2006). Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Editado en: Medellín (Colombia).

Zapata, R. D. (2014). Los procesos químicos del suelo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Editado en: Medellín (Colombia).