



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CDVJ), COLOMBIA

Andrés David Velásquez Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C, Colombia

2023

USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA

Andrés David Velásquez Rodríguez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ciencias Geología

Director (a):

Ph.D., Ingeniera Geóloga, Susana Salazar Jaramillo

Codirector (a):

Ph.D., Agróloga, Yolanda Rubiano Sanabria

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C, Colombia
2023

*“Adoramos el caos porque amamos producir
orden”*

M.C. Escher

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Andrés David Velásquez R.

Fecha DD/MM/AAAA

Fecha 10/09/2023

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia y la Facultad de Ciencias, quienes, a través de la beca “Efi-ciencias” permitieron que continuara mi proceso académico y profesional en el transcurso de estos años y durante la pandemia.

A mi directora, profesora Susana Salazar, por fomentar las discusiones que inspiraron esta propuesta, por su paciencia y compromiso, mis admiraciones.

A mi co-directora, profesora Yolanda Rubiano, quién guio el componente pedológico, compartió su experiencia y, además, aconsejó con sabiduría en momentos de dificultad.

Al doctor Jorge Sánchez Espinoza (Q.E.P.D.) y al Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, por brindarme la oportunidad de aprender sobre análisis de minerales.

Al equipo de la Universidad de los Andes, profesora Natalia Pardo, profesores Miguel Cabrera y Ricardo Camacho, así como a Santiago Villota, quienes retroalimentaron la investigación y gestionaron recursos económicos y logísticos para el desarrollo de actividades de campo y laboratorio.

Al equipo del Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional, con su antigua coordinadora la profesora Martha Henao, quien me asesoró con los ensayos de laboratorio.

Al profesor Jimmy Fernández, del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional, con quien desarrollé mis actividades como becario y orientó en el análisis mineralógico.

A la comunidad de Las Mesas, Familia Erazo e Hijos de Mamá Juana, por su apoyo durante mi estadía y por las experiencias compartidas.

Al equipo de Parques Nacionales Naturales, en especial a Wilfer, guardaparques, que me ayudó y guio en el sitio de estudio.

Resumen

Uso del suelo como indicador de la sensibilidad del paisaje en el Complejo Volcánico Doña Juana (CVDJ), Colombia

El sistema acoplado suelo-paisaje es complejo y usualmente las aproximaciones para su estudio parten de modelos reduccionistas que, si bien son efectivos, no abordan las interrelaciones entre componentes del sistema que regulan su comportamiento. Esta propuesta complementa el concepto de amenaza, y busca describir el desarrollo de suelo como resultado de la interacción de procesos de erosión y depositación que compiten para dar forma al paisaje. Esto se logra a partir de la construcción de un modelo conceptual pedológico que explica las funciones entre componentes y un modelo de retroalimentación dinámica, realizado en Vensim [®] *software*, que permite la simulación de sistemas dinámicos. En el primer capítulo se describe la concepción del modelo pedológico y responde al objetivo de relacionar las propiedades del suelo con la posición del paisaje. En el segundo capítulo se presentan las relaciones de componentes y la simulación dinámica para evaluar sensibilidad. Se identifica que el comportamiento del desarrollo de suelo, frente a la posición del paisaje, es asintóticamente inestable y potencialmente caótico, lo que explica la variabilidad de los subgrupos taxonómicos de suelo descritos en el área piloto, la Quebrada Humadal. A su vez, el análisis de sensibilidad, indica que el sistema se autorregula y que el proceso que lo controla, en escalas temporales de una vida humana, es la erosión.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, complejidad, pedología, simulación

Abstract

Use of soil as landscape sensitivity index. Quebrada Humadal, Doña Juana Volcanic Complex (DJVC), Colombia.

The coupled soil-landscape system is complex and usually the approaches for its study are based on reductionist models, which, although effective, do not address the interrelationships between system components that regulate their behavior. This proposal, complements hazard assessments and seeks to describe land development as a result of the interaction between erosion and deposition processes that compete to shape the landscape. This is achieved from the construction of a conceptual pedological model that explains the functions between components and a dynamic feedback model, made in Vensim ® software, that allows the simulation of dynamic systems. The first chapter describes the conception of the pedological model and responds to the objective of relating the properties of the soil with its position on the landscape. In the second chapter, component relationships and dynamic simulation to assess sensitivity are presented. It was observed that the behavior of soil development, in relation to landforms, is asymptotically unstable and potentially chaotic, which explains the variability of soil taxonomic subgroups in the Humadal stream. Sensitivity analyzes at the human scale showed that the system is mainly self-regulated by erosion.

Keywords: Dynamical systems, complexity, pedology, simulation

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Lista de figuras	XVI
Lista de tablas.....	XVIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XX
Introducción general	1
1. Capítulo 1: Pedología de una catena en el Complejo Volcánico Doña Juana	3
1.1 Resumen	3
1.2 Abstract	5
1.3 Introducción	6
1.4 Sistema suelo-paisaje.....	7
▪ 1.4.1 Conceptualización de un modelo evolutivo	9
▪ 1.4.2 Marco geológico.....	11
Formación Loma Seca (Ls)	12
▪ Formación El Hático – La Laguna (hl).....	13
▪ Formación Montoso Superior (mt _s)	14
▪ Formación La Cruz (Lcr).....	14
▪ Formación Las Mesas (lm)	14
▪ 1.4.3 Geomorfología.....	15
▪ 1.4.4 Paleoclima y clima	17
▪ 1.4.5 Paleosuelos	18
1.5 Métodos	20

▪ 1.5.1 Fase de campo	21
▪ 1.5.2 Fase de laboratorio	21
▪ 1.5.3 Fase de análisis.....	22
1.6 Resultados	22
▪ 1.6.1 Pedología	24
▪ Suelos del tramo alto de la cuenca	26
▪ Suelos del tramo medio de la cuenca	28
▪ Suelos del tramo bajo de la cuenca	29
1.7 Interpretación y discusión.....	30
▪ 1.7.1 Correlaciones estratigráficas	30
▪ 1.7.2 Procesos pedológicos	31
▪ 1.7.3 Desarrollo de suelo.....	33
1.8 Conclusiones.....	40
1.9 Referencias.....	41
2. Capítulo 2: Morfodinámica del Volcán Doña Juana mediante análisis de sensibilidad del paisaje	49
2.1 Resumen	49
2.2 Abstract.....	50
2.3 Introducción.....	52
▪ 2.3.1 Dinámica de sistemas.....	54
▪ 2.3.2 Sensibilidad a condiciones iniciales	54
2.4 Métodos	57
▪ 2.4.1 Evaluación de la sensibilidad.....	57
▪ 2.4.2 Índice morfodinámico (GI).....	58
▪ Susceptibilidad.....	59
▪ Simulación de erosión.....	61

▪ 2.4.3 Diagrama de Forrester: relaciones causales entre procesos pedogenéticos y grado de desarrollo del suelo	61
▪ 2.4.4 Índice de desarrollo de suelo (pedológico).....	63
2.4.4.1 Variable de nivel 1: ACUMmo.....	65
2.4.4.2 Variable de nivel 2: PROFsuelo	66
2.5 Resultados	68
▪ 2.5.1 Susceptibilidad	68
▪ 2.5.2 Simulación de erosión	70
▪ 2.5.3 Índice morfodinámico (GI).....	71
▪ 2.5.4 Índice pedológico en el modelo dinámico.....	74
▪ 2.5.5 Sensibilidad del modelo dinámico a condiciones iniciales	78
2.6 Discusión.....	81
▪ 2.6.1 Implicaciones frente a la evolución del paisaje.....	81
▪ 2.6.2 Implicaciones frente a estudios de amenaza	82
2.7 Conclusiones	83
2.8 Referencias	84
A. Anexo: Descripción de los perfiles de suelo.....	89
B. Anexo: Valoración de propiedades morfológicas y físico-químicas	99

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Ubicación del área de estudio y cuenca de la Quebrada Humadal.....	7
Figura 1-2: Esquema de la teoría clásica basada en la función de factores formadores. Los factores actúan como límites para las condiciones del sistema	8
Figura 1-3: Interacción de las fuerzas en la interfaz litosfera-atmósfera en la que se encuentra el sistema acoplado suelo-paisaje	9
Figura 1-4: Ejemplos de relaciones del manto de suelo con procesos de sedimentación en laderas y valles.....	11
Figura 1-5: Columna estratigráfica y corte geológico del área de estudio. Kcqq: Complejo Quebradagrande, ls: Formación Lomaseca, hl: Formación Hático-La Laguna, lcr: Formación La Cruz, lmi: Las Mesas Miembro Inferior, lmm: Las Mesas Miembro Intermedio, lmu: Las Mesas Miembro Superior	13
Figura 1-6: Formas del terreno en la Quebrada Humadal. Dle: Ladera erosiva, Slfe: Crestón festoneado, Vlfp: Lóbulo de flujos piroclásticos, Dlres: Lomo residual, Deem: Escarpe de erosión menor	16
Figura 1-7: Perfil altitudinal de las vertientes del CVDJ y los flujos de masas de aire	18
Figura 1-8: Emplazamiento de lóbulos de flujos de piroclastos en paleovalles,	19
Figura 1-9: Representación de los procesos que representan la estabilidad del paisaje. A) suelos compuestos en cuerpos de lóbulos piroclásticos antiguos donde predomina la sedimentación discontinua, B) suelos cumulativos donde predomina la pedogénesis y se tiene sedimentación continua, C) suelos poco desarrollados en zonas de ladera en donde influyen procesos erosivos.	19
Figura 1-10: Perfil topográfico y geoformas asociadas a la catena de la Quebrada Humadal. Dle: Ladera erosiva, Slfe: Crestón festoneado, Vlfp: Lóbulo de flujos piroclásticos, Dlres: Lomo residual, Deem: Escarpe de erosión menor.....	23
Figura 1-11: Catena de la Quebrada Humadal. LS: Formación Lomaseca, LC: Formación La Cruz, Lmi: Formación La Mesa Miembro Inferior, Lmm: Formación La Mesa Miembro Intermedio.....	23
Figura 1-12: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LS2	27
Figura 1-13: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LS1	28
Figura 1-14: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LM2.....	29

Figura 1-15: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LM1	30
Figura 1-16: Correlaciones pedoestratigráficas para los perfiles trabajados	31
Figura 1-17: Carácter ándico de los horizontes estudiados	32
Figura 1-18: Variables del paisaje a considerar, distancia al edificio volcánico y tiempo de exposición	35
Figura 1-19: Biplot variables en componentes 1 y 3	37
Figura 1-20: Biplot variables en componentes 1 y 2	37
Figura 1-21: Relación entre los factores desarrollo de suelo y distancia al edificio volcánico.	38
Figura 1-22: Relación entre el factor desarrollo de suelo y la capacidad de acumular materia orgánica	39
Figura 1-23: Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Humadal	40
Figura 2-1: Comportamientos básicos de los sistemas proceso-respuesta.....	53
Figura 2-2: Esquema relación de condicionantes, interacciones y respuesta del modelo dinámico	55
Figura 2-3: Diferencia de dos trayectorias seguidas por el sistema dinámico	56
Figura 2-4: Método para la evaluación de la sensibilidad del paisaje. WoE: Pesos por evidencia, Pond: Suma ponderada, FRM: Fenómenos de Remoción en Masa	58
Figura 2-5: Cálculo del peso por evidencia (W) para cada categoría de los factores condicionantes. Wf es peso de ponderación; Wi+ es el peso positivo i que tiene el condicionante (es decir cuanto pesa cuando está presente); Wi- es el peso negativo i que tiene el condicionante (es decir cuanto pesa cuando está ausente).....	60
Figura 2-6: Esquema general de estimación de susceptibilidad a FRM	61
Figura 2-7: Diagrama de Forrester del sistema suelo-paisaje para la Quebrada Humadal, el signo indica la relación con otros factores inversa (negativo) o directa (positivo).....	62
Figura 2-8: Relaciones causales de la variable de nivel "Desarrollo de Suelo". Variables causales (FRM, andolización, etc.) que explican el desarrollo de suelo.	63
Figura 2-9: Modelo dinámico suelo-paisaje para la Quebrada Humadal	64
Figura 2-10: Tendencia exponencial de aumento de espesor del horizonte A respecto a la distancia al edificio volcánico.....	65
Figura 2-11: Comportamiento logarítmico de la andolización	67
Figura 2-12: Mapa de susceptibilidad normalizada a FRM	70
Figura 2-13: Procesos de erosión y depósito en simulación con CAESAR-Lisflood. A) Acumulación de material formando una terraza aluvial. B) Erosión por deslizamientos en escarpe	71
Figura 2-14 En azul se observan las zonas de erosión y morado las de depositación. Se puede observar que las zonas que presentan mayor cambio son las que se relacionan al cauce aluvial y los sectores escarpados. Las geoformas más estables son los planos de lóbulos aterrazados	72
Figura 2-15: Simulación para el caso de una ladera.....	76
Figura 2-16: Simulación para el caso de la parte baja de la cuenca sobre plano de lóbulo	76
Figura 2-17: Escenarios 3 y 4, zona proximal (a) y distal(b)	77

Figura 2-18: Diferencia entre casos extremos del índice morfodinámico 79
Figura 2-19: Diferencia entre casos extremos de distancia al edificio volcánico. 80
Figura 2-20: Comportamiento del logaritmo de la sensibilidad, evidenciando la disminución de su pendiente con el tiempo, asociada a un atractor 80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Definiciones de unidades geomorfológicas.....	16
Tabla 1-2 Propiedades morfológicas y fisicoquímicas para los horizontes.....	25
Tabla 1-3 Índices de desarrollo para propiedades morfológicas y fisicoquímicas.....	34
Tabla 1-4: Pruebas de ajuste del modelo de componentes	35
Tabla 1-5: Varianza total explicada	36
Tabla 1-6: Índices por variable dentro del componente rotado	36
Tabla 2-1: Variables evaluadas en la determinación de susceptibilidad a FRM de factores condicionantes.....	60
Tabla 2-2 Valores de pesos de evidencia para categorías de la pendiente.....	69
Tabla 2-3. Valores de pesos de evidencia para cada geoforma	69
Tabla 2-4: Valores del Índice Geomorfológico para las unidades geomorfológicas de la Quebrada Humadal	73
Tabla 2-5: Escenarios evaluados en el modelo	74
Tabla 2-6: Descripción morfológica perfil LS2	89
Tabla 2-7: Descripción morfológica perfil LM3.....	91
Tabla 2-8: Descripción morfológica perfil LM4.....	92
Tabla 2-9: Descripción morfológica perfil LM1.....	93
Tabla 2-10: Descripción morfológica perfil LM2.....	94
Tabla 2-11: Descripción morfológica perfil LM3.2.....	95
Tabla 2-12: Descripción morfológica perfil LS1	96
Tabla 2-13: Cálculo del índice de desarrollo PDI (color) para cada horizonte.....	99
Tabla 2-14. Cálculo del índice de desarrollo PDI (textura y consistencia) para cada horizonte.....	100
Tabla 2-15. Cálculo del índice de desarrollo PDI (estructura) para cada horizonte.....	101
Tabla 2-16. Cálculo del índice de desarrollo PDI (total) y normalizado.....	103

Tabla 2-17. Cálculo del índice de desarrollo IPA para propiedades químicas.....	104
Tabla 2-18: Pesos por evidencia para unidades geológicas	104
Tabla 2-19: Pesos por evidencia para curvatura del relieve	106
Tabla 2-20: Pesos por evidencia para distancia a drenajes.....	106

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>yr BP</i>	Años antes del presente	años	Años antes de 1950

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
λ	Exponente de Lyapunov	1	$\lambda_i(x_0)$ $= \log \Lambda_0(x_0)$

Subíndices

Subíndice	Término
<i>i</i>	Año de simulación
VAR	Variable

Superíndices

Superíndice	Término
<i>n</i>	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
FRM	Fenómenos de Remoción en Masa
CVDJ	Complejo Volcánico Doña Juana
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
<i>Vensim</i>	Software de simulación de sistemas dinámicos de Ventana Software

Introducción general

El paisaje es un sistema dinámico de la naturaleza, sus cambios, provocados o no, son interdependientes con la actividad humana y representan oportunidades o amenazas (Tricart & Kilian, 1979; Zinck, 2016). Entender las relaciones entre los cambios abruptos del paisaje, típicos de ambientes volcánicos, y sus efectos, es una tarea compleja. El objeto de estudio incorpora, por tanto, la visión sistémica del paisaje, la cual resulta adecuada para evaluar la dinámica de sus componentes (Phillips, 1999). La propiedad usada para esta evaluación es la sensibilidad del paisaje, pues indica la magnitud de la respuesta de sus componentes frente a un cambio en las condiciones del sistema (Brunsdén, 2001). Estos cambios pueden medirse tanto en las propiedades de las geoformas, como en las del suelo (Simonsons, 1959; Yaalon, 1983). Es por eso que, la memoria del paisaje (Brierley, 2010) y la memoria del suelo (Yaalon, 1983), pueden ayudar a entender y gestionar el territorio.

Este trabajo implementa el método propuesto sobre un área piloto, la Quebrada Humadal, y busca establecer las relaciones entre los procesos pedogenéticos y morfodinámicos que controlan el paisaje del flanco suroeste del Complejo Volcánico Doña Juana, Nariño. Tales relaciones se miden mediante el análisis de las propiedades morfológicas, fisicoquímicas y diagnóstico del suelo, para luego entender el comportamiento del sistema acoplado suelo-paisaje usando indicadores de la sensibilidad del paisaje.

En el primer capítulo se expone el marco pedológico de la cuenca, la génesis de suelos y cómo se comportan dentro del paisaje. A partir de la construcción de un índice de desarrollo pedogenético, se evalúa el efecto de la distancia al edificio volcánico y el tiempo de exposición de una superficie con los procesos dominantes.

En el segundo capítulo se construye el modelo suelo-paisaje, utilizando las relaciones empíricas identificadas en el apartado anterior. En el modelo se evalúa la sensibilidad del sistema al régimen de erosión/depositación y posición de la cuenca, lo cual se refleja en la morfología y desarrollo de los perfiles de suelo.

1. Capítulo 1: Pedología de una catena en el Complejo Volcánico Doña Juana

1.1 Resumen

La relación suelo-paisaje amplía la dimensión natural del territorio brindando una perspectiva de los procesos que modifican las condiciones del suelo en diferentes escalas temporales. Los paisajes volcánicos se caracterizan por su dinamismo contrastante, entre períodos de calma y actividad. Entender que, aún dentro de su comportamiento impredecible, se conforman relaciones estables que permiten el desarrollo de ecosistemas y el asentamiento de poblaciones, ofrece una visión menos hostil de estas regiones. A lo largo de la Quebrada Humadal se examinaron los rasgos morfológicos y analíticos de siete perfiles de suelo actuales, y tres paleosuelos, con el objetivo de definir relaciones espaciotemporales y proponer un modelo evolutivo del paisaje.

En una geomorfología dominada por lóbulos de flujos piroclásticos, los suelos recientes se localizan en la superficie de los planos de lóbulos. Dentro de la misma sucesión estratigráfica se encuentran los paleosuelos sepultados a mayor profundidad, formando perfiles poligenéticos. Los paleosuelos abarcan edades desde el Pleistoceno (~320 KyrBP) hasta el Holoceno (~3000 yrBP). Las propiedades pedogenéticas, como contenido de materia orgánica, y las propiedades ándicas, permitieron establecer el grado de madurez, así como la intensidad de los procesos pedogenéticos específicos: acumulación, andolización, y melanización. De igual forma, se analizaron índices de desarrollo de suelo mediante componentes principales para determinar qué factor, entre la distancia al edificio volcánico y el tiempo, tuvo mayor influencia en el desarrollo de los perfiles.

Mediante estos análisis se pudo concluir que el grado de madurez está directamente relacionado con el tiempo de exposición de la superficie geomorfológica. Los suelos con

4 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

mayor desarrollo se encuentran en las superficies más antiguas de la parte alta de la cuenca. Estos suelos maduros tienen propiedades ándicas bien definidas, alto contenido de materia orgánica y pueden mostrar ambos caracteres, silándico o aluándico, dependiendo del contenido de materia orgánica. Los suelos con grado moderado de desarrollo están sobre lóbulos holocénicos en la superficie de los depósitos más recientes. poseen valores intermedios de materia orgánica y son aluándicos. Mientras los suelos maduros se clasifican como Andisoles, los más recientes se clasifican como Inceptisoles. A lo largo de la catena, se observa una tendencia a aumentar el desarrollo con la distancia al edificio volcánico. Sin embargo, en la parte media de la cuenca los suelos pueden verse rejuvenecidos por la acumulación de material coluvial.

Palabras clave: andolización, Cuaternario, paleosuelo, evolución del paisaje

1.2 Abstract

The soil-landscape relationship expands the natural dimension of the territory, providing a perspective of the processes that modify soil conditions at different time scales. Volcanic landscapes are characterized by their contrasting dynamism between periods of calm and activity. Even within their unpredictable behavior, stable relationships are formed allowing the development of ecosystems and the settlement of populations, which offers a less hostile vision of these regions. Throughout the Quebrada Humadal, the morphological and analytical features of seven current soil profiles and three paleosols were examined with the aim of defining spatiotemporal relationships and proposing an evolutionary model of the landscape. In a geomorphology dominated by lobes of pyroclastic flow, recent soils are located on the surface of the lobe planes. Within the same stratigraphic succession, the paleosols are found buried within the same stratigraphic succession at greater depth. Furthermore, the profiles are polygenetic. The paleosols span ages from the Pleistocene (~320 KyrBP) to the Holocene (~3000 yrBP). The pedogenetic properties, such as organic matter content and the andic properties, allowed to establish the degree of maturity, as well as the intensity of the specific pedogenetic processes of cumulization, andolization, and melanization. Similarly, soil development indices were analyzed through principal components to determine which factor, between the distance to the volcanic edifice and time, had the greatest influence on the development of the profiles. Through these analyzes it was possible to conclude that the degree of maturity is directly related to the exposure time of the geomorphological surface. The most developed soils are found in the oldest surfaces in the upper part of the basin. These mature soils have well-defined andic properties, high organic matter content, and can show both silandic and aluandic characters, depending on the organic matter content. These mature soils are classified as Andisols. The soils with a moderate degree of development are on Holocene lobes, on the surface of the most recent deposits. They have intermediate values of organic matter and are aluandic. While mature soils are classified as Andisols, the less developed ones are classified as Inceptisols. Along the catena, there is a tendency to increase development with distance from the volcanic edifice. However, in the middle part of the basin, soils can be rejuvenated by the accumulation of colluvial material.

Keywords: andolization, Quaternary, paleosol, landscape evolution

1.3 Introducción

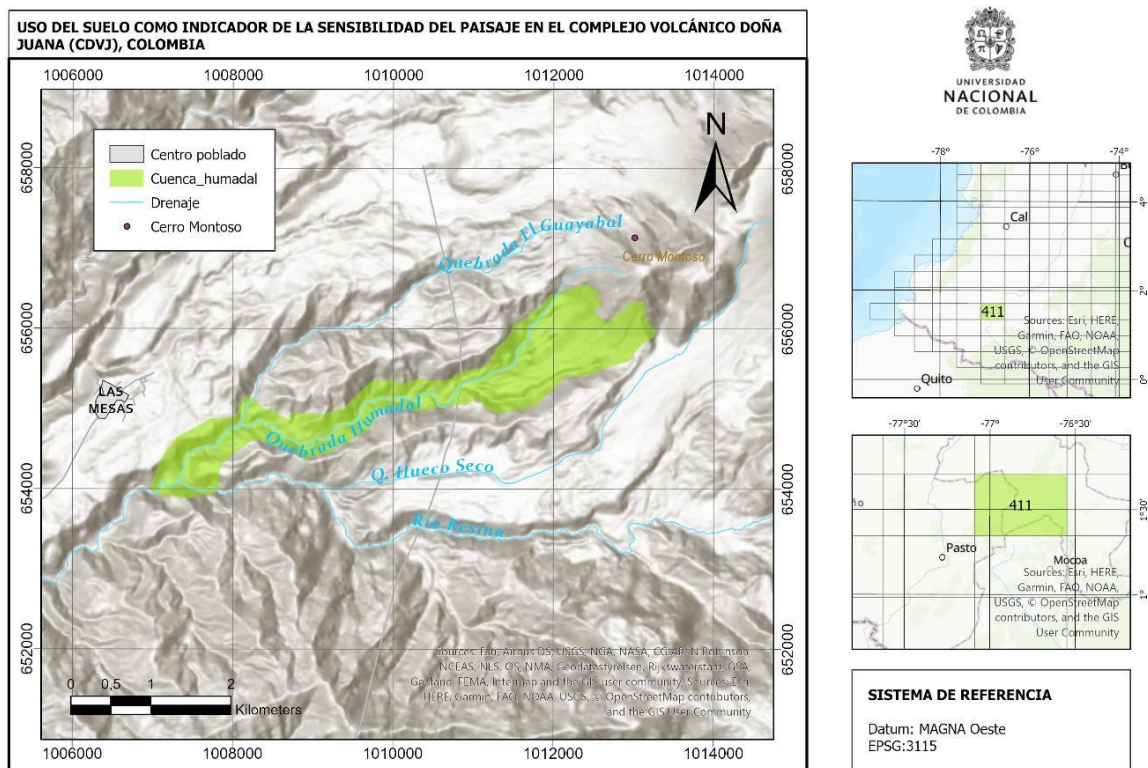
El Parque Nacional Natural–Complejo Volcánico Doña Juana (PNN-CVDJ) se ubica en el departamento de Nariño, en el punto de convergencia entre las cordilleras Central y Oriental. Hace parte del corredor biológico que conecta a los Andes con la Amazonía y el valle xerofítico del Patía, contiene varios ecosistemas tropicales y de alta montaña en los que se resguarda alta biodiversidad (Solarte-Cruz, et al., 2007; UAESPNN, 2008; Pantoja, 2016). El paisaje de la zona está conformado por los edificios de los volcanes Ánimas, Petacas y Doña Juana, que son considerados lugares sagrados por las comunidades indígenas que habitan el sector (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Estos elementos lo definen como un área con unas condiciones naturales y culturales de gran valor científico, educativo, estético, patrimonial y recreativo (MAVDT, 2007; Parques Nacionales Naturales, 2017).

La posición geográfica, las condiciones geológicas y volcánicas, el clima y la vegetación de alta montaña tropical, le otorgan unas características particulares a los suelos que evolucionan en esta zona (Shoji, et al., 1993; Tsai, et al., 2010; Sánchez Espinosa & Rubiano Sanabria, 2015). Por ejemplo, éstos acumulan materia orgánica y nitrógeno, además, funcionan como reservorios de agua y permiten el fácil desarrollo de la vegetación (Shoji & Takahashi, 2002). Las propiedades físicas, textura franco-arenosa, estructura moderadamente desarrollada, consistencia friable, no plástica, ni pegajosa, posibilitan las labores de labranza. Además, favorecen los procesos gravitacionales en las pendientes escarpadas (Giraldo-Obando, 2012) por las condiciones climáticas locales con precipitaciones de $\sim 2048.6 \pm 363.3$ mm/año (Salazar, et al., 2022) y temperatura anual de 16°C (Universidad de Nariño; IAvH, 2015). Las laderas son inestables debido al fenómeno de tixotropía en el que, bajo presión, el suelo sobrepasa su límite plástico (Shoji, et al., 1993, p. 196). Por tal motivo, es necesario entender cómo responde este sistema suelo-paisaje a las perturbaciones ambientales; es decir, qué sectores son más sensibles a determinados procesos. Lo anterior, con el fin de orientar usos y prácticas de manejo que no degraden el suelo o impliquen un riesgo para las comunidades que habitan la región.

La unidad básica del sistema acoplado suelo-paisaje es la catena (Yaalon, 1975; Huggett, 1975), que describe unidades de suelo condicionados por flujos de energía y materia en

una dirección dominante controlada por el relieve. Por esto el objetivo de este primer capítulo es definir las interacciones entre los factores formadores (material parental, relieve, clima, organismos y tiempo) para el área piloto de la Quebrada Humadal (**Figura 1-1**). Específicamente, se pretende entender las relaciones entre el grado de desarrollo pedogenético, la posición dentro de la cuenca y el tiempo de exposición a partir de las propiedades morfológicas y analíticas de varios perfiles de suelo.

Figura 1-1: Ubicación del área de estudio y cuenca de la Quebrada Humadal



Fuente: Elaboración propia, sobre mapa de sombras de Esri. .

1.4 Sistema suelo-paisaje

La complejidad de la naturaleza exige modelos holísticos para su análisis (Anderson, 1972). No obstante, debe tenerse en cuenta que el suelo tiene diferentes connotaciones dependiendo de la disciplina que lo estudia (Retallack, 2001; SCPE, ICS, 2004; Bockheim, et al., 2005) En este trabajo se adopta el modelo acoplado suelo-paisaje, que se desarrolla

8 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

a partir de las definiciones planteadas por Dokuchéyev (1893) y Jenny (1958) en función de los factores de formación del suelo (**Figura 1-2**). Otras aproximaciones complementan esta definición. Así, el suelo es un cuerpo natural continuo en el tiempo y en el espacio (Soil Survey Staff, 2014) que puede concebirse como un sistema termodinámico abierto porque intercambia masa y energía con su entorno (Phillips, 1999). En estos flujos intervienen procesos que pueden ser, según Simonsons (1959), ganancias, pérdidas, translocaciones o transformaciones.

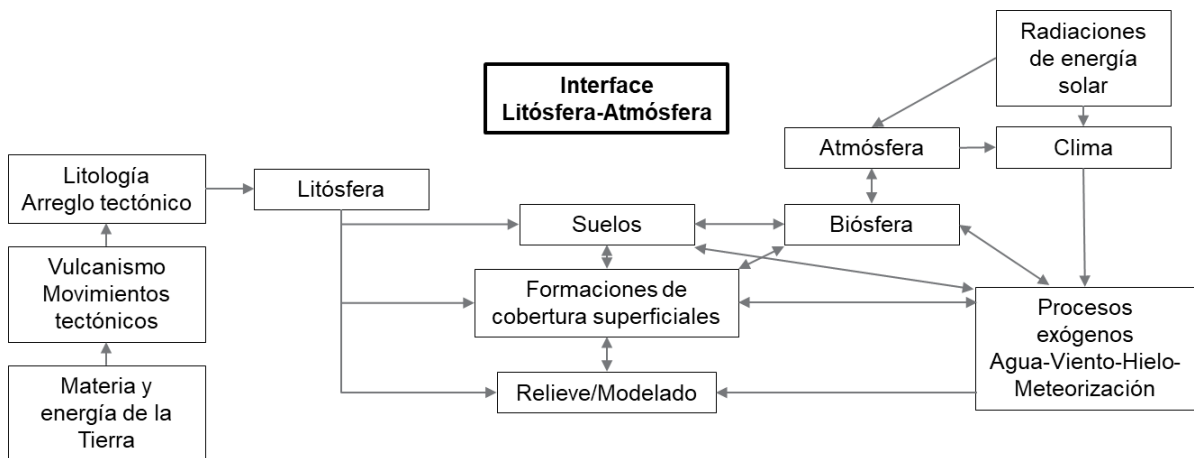
Figura 1-2: Esquema de la teoría clásica basada en la función de factores formadores. Los factores actúan como límites para las condiciones del sistema.



La unidad básica para el estudio del suelo es el pedón, el volumen más pequeño que puede considerarse suelo y que alberga todas las propiedades físicas, químicas y morfológicas (Simonsons & Gardner, 1960). Sin embargo, a escalas espaciales mayores resulta apropiada la catena (Yaalon, 1975; Huggett, 1975), o toposecuencia, que permite identificar patrones de suelos en el paisaje (Fridland, 1974). La catena se define como una sucesión de suelos, genéticamente relacionados, a lo largo de un transecto en donde el único factor formador que varía es el relieve (Jenny, 1958). Las propiedades de esta unidad del paisaje incluyen flujos predominantemente unidireccionales condicionados por la gravedad e hidrología (Fridland, 1974; Huggett, 1975). Además, algunas funciones como la sedimentación-erosión, pueden estar en equilibrio dinámico; es decir, no hay ganancia neta (Dan & Yaalon, 1964).

La unidad acoplada suelo-paisaje se entiende como el producto de la transformación de energía de fuentes endógenas y exógenas (**Figura 1-3**). El sistema acoplado tiene en cuenta la interdependencia de los factores que intervienen en la morfogénesis o pedogénesis (Tricart, 1965; Tricart & Kilian, 1979; Huggett, 2011; Zinck, 2016) y su delimitación se realiza mediante una aproximación geopedológica (Zinck, 2016).

Figura 1-3: Interacción de las fuerzas en la interfaz litosfera-atmósfera en la que se encuentra el sistema acoplado suelo-paisaje



Fuente: Modificado de Zinck (2016) y Tricart (1972)

1.4.1 Conceptualización de un modelo evolutivo

En la teoría clásica, el desarrollo de suelo sigue una única ruta pedológica llegando a un estado de equilibrio estacionario con el entorno, es decir a una morfología clímax o zonal (Phillips, 1998). En contraposición, el modelo evolutivo actual dice que, para unas mismas condiciones iniciales, se tienen múltiples resultados posibles debido a que el suelo se transforma continuamente y tiene un equilibrio metaestable (Huggett, 1998; Phillips, 1998). En relación con esto Huggett (1975) propone un enfoque constructorista, donde los modelos resumen la estructura de todo el sistema.

Si bien, la evolución de un perfil puede resultar compleja, algunos procesos dejan evidencias irreversibles en el suelo (Yaalon, 1971; Yaalon, 1983). Esto quiere decir que el suelo tiene memoria (Monger & Rachal, 2013) y una descripción detallada de las características del suelo permite inferir tendencias pedológicas (Cline & Johnson, 1963).

10 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

Las clasificaciones taxonómicas se basan en funciones de estado para ciertas características diagnósticas, que describen los efectos de una ruta pedológica dominante (Soil Survey Staff, 1999). Es posible entonces reconstruir la historia de los componentes del sistema suelo-paisaje mediante la clasificación taxonómica, (e.g. (Monger & Bestelmeyer, 2006; Tsai, et al., 2007; Monger & Bestelmeyer, 2006).

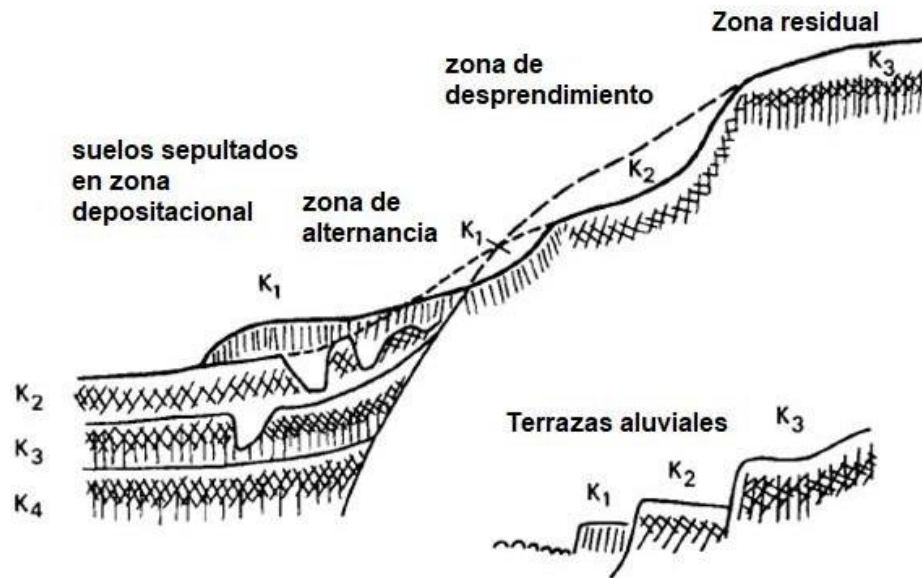
En cuanto a los cambios del paisaje, Butler (1959), estudió los fenómenos periódicos de sedimentación-erosión que ocurren en la superficie y su relación con el desarrollo de suelos. Él propone el concepto de manto de suelo, o *pedoderma* (Brewer, et al., 1970), para estudiar el paisaje en términos de ciclos pedogenéticos o “ciclos-K” (Butler, 1982; Bockheim, et al., 2005). Cada ciclo explica la superposición de mantos de suelo en varias fases. La primera fase es la formación de nuevas superficies geomorfológicas, bien sea por erosión, o por sedimentación, luego se intercala con una fase de desarrollo de suelo, en la que la superficie es estable (Butler, 1982). En la **Figura 1-4**. se muestra un primer ciclo K4 en el que la erosión de la ladera provoca la acumulación de sedimento dentro del valle aluvial, seguido de un periodo de estabilidad en el que la ladera no aporta sedimentos y es posible el desarrollo de suelo en las partes bajas; sin embargo, en el ciclo K3, nuevamente hay erosión, lo que causa la sepultura del suelo anterior repitiéndose el ciclo. Cabe notar que los suelos más viejos, tienden a ocupar las partes altas del relieve en donde no hay erosión, como es el caso de las terrazas (abajo a la derecha) en el que las terrazas jóvenes se ubican en la parte más cercana al cauce aluvial.

De manera similar la Comisión Norteamericana de Estratigrafía (2005) reconoce al *geosol*, como unidad pedoestratigráfica, que representa una discontinuidad. Está determinada por un periodo de baja o nula depositación y se diferencia del manto de suelo en que no contempla los materiales subyacentes.

Siguiendo este orden de ideas, al clasificar un suelo taxonómicamente es posible identificar tendencias en su génesis y la temporalidad relativa de los procesos. En otras palabras, el perfil de suelo y el material parental dan la temporalidad y su posición en el paisaje la distribución espacial. Por esta razón, es posible en zonas volcánicas realizar correlaciones a partir de estas superficies geomorfológicas con desarrollo de suelo, para determinar

eventos de calma eruptiva (Lucchi, 2013). Esta relación espaciotemporal, es lo que permite dar un marco geomorfocronológico al sistema dentro de la Quebrada Humadal.

Figura 1-4: Ejemplos de relaciones del manto de suelo con procesos de sedimentación en laderas y valles



Fuente: Tomado de Butler (1982)

1.4.2 Marco geológico

La caracterización geológica del Complejo Volcánico Doña Juana inicia con los estudios de Steimle (1989) quién describe una serie de períodos de actividad volcánica que suponen la formación y superposición de varios edificios volcánicos desde hace 2.5Ma. La actividad más reciente fue caracterizada por Navarro, et al., (2009) quienes concluyen que hubo tres períodos eruptivos, cada uno con una fase constructiva inicial (Fisher & Schmincke, 1984). Adicionalmente, se registran varios niveles de ceniza y depósitos de flujos de pómez que se han canalizado por los paleovalles de los ríos del sector, como el Mayo y Juananbú (Naranjo Heano, et al., 2009; Navarro, et al., 2009). En contraste Pardo, et al., (2016) describieron cinco periodos eruptivos para el volcán Doña Juana, cada uno asociado a un edificio volcánico distinto. Los eventos constructivos y destructivos que, por lo general, comprenden el emplazamiento de domos de lava y su posterior colapso, se

12 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

intercalan con períodos de calma en los que predominan procesos erosivos o la formación de suelos (Pardo, et al., 2018). Estos suelos enterrados conforman los estratos guía en la estratigrafía del volcán y de las geofomas.

El vulcanismo, el clima y la actividad tectónica en el CVDJ han modificado su relieve. Este territorio es dinámico y los fenómenos geológicos que pueden constituir una amenaza son frecuentes. Además, las pendientes escarpadas y propiedades físicas de los suelos de esta región, los hacen susceptibles a fenómenos de remoción en masa (Giraldo-Obando, 2012). Los fenómenos de mayor escala se registran en unidades estratigráficas (Pardo, et al., 2018). Por otro lado, los procesos de menor escala o momentáneos, sólo se observan en los suelos y paleosuelos.

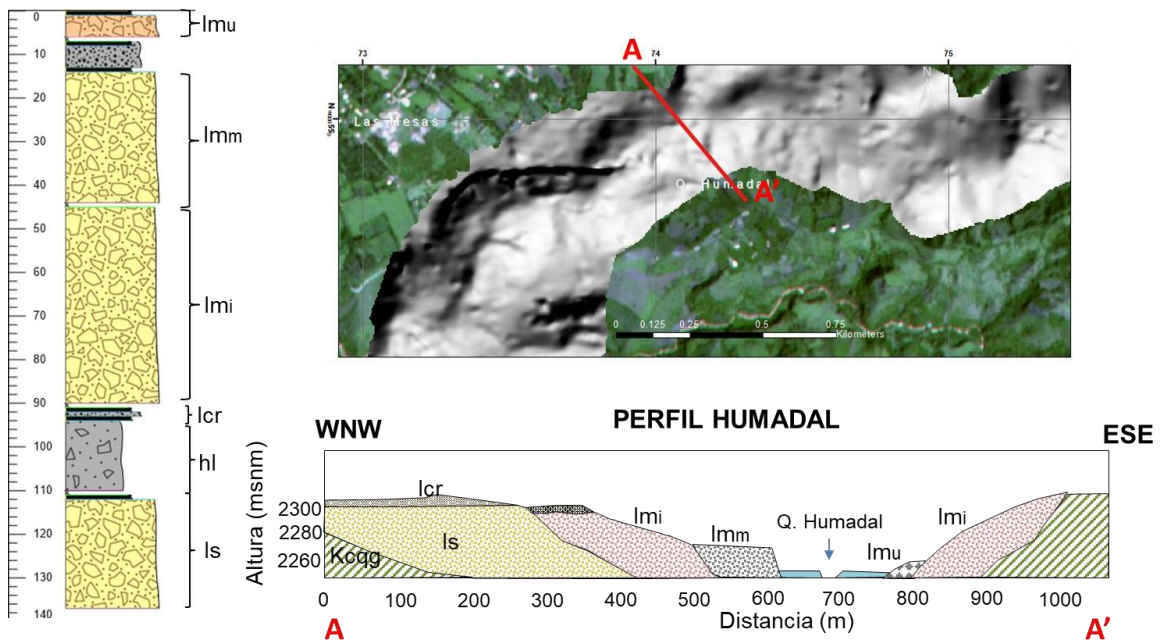
En el sector de la Quebrada Humadal se tiene una sucesión litológica que comprende unidades con edades desde hace 312 ka, según lo reportado por Pardo, et al., (2016). La Formación Loma Seca (312.1 ± 28.8 ka edad *plateau* Ar/Ar) es un conjunto de depósitos de flujos piroclásticos expuestos por la erosión. Constituyen las crestas que delimitan el paleovalle de la quebrada y están suprayacidos por depósitos de caída de la Formación La Cruz (4422 ± 28 yr BP). En este paleovalle se depositaron los flujos piroclásticos de las formaciones El Hático-La Laguna (230.8 ± 13.3 ka) y Las Mesas (3050 yr BP). Este registro estratigráfico enmarca cuatro sucesiones de paleosuelos (Pardo, et al., 2018) tal como se muestra en la **Figura 1-5**.

Formación Loma Seca (Ls)

En el área de la Quebrada Humadal se compone de dos miembros, el Miembro Inferior es un depósito de flujo de bloques y ceniza producto del colapso de los domos ubicados en la cabecera de la quebrada. Este miembro se compone de fragmentos de dacitas subangulares tamaño bloque, en una matriz de ceniza lítico-cristalina. El Miembro Superior, se compone de dos depósitos masivos con fragmentos redondeados de pómez lapilli y líticos negros, afaníticos, en matriz de ceniza fina, separados por una capa laminada de ceniza fina. Se interpreta como depósitos de Corrientes Densas de Piroclastos (CDP) concentradas (masivos) y diluidas interestratificados con depósitos de caída (Pulgarín, et al., 2008). El límite superior de este miembro es un paleosuelo pardo arcillo-

limoso con moteados, y está suprayacido en contacto erosivo por la Formación La Cruz (Pardo, et al., 2016).

Figura 1-5: Columna estratigráfica y corte geológico del área de estudio. Kcgg: Complejo Quebradagrande, Is: Formación Lomaseca, hl: Formación Hático-La Laguna, lcr: Formación La Cruz, lmi: Las Mesas Miembro Inferior, lmm: Las Mesas Miembro Intermedio, lmu: Las Mesas Miembro Superior.



Fuente: Tomado y modificado de (Pulgarín, et al., 2008)

- Formación El Hático – La Laguna (hl)

Es un conjunto de ignimbritas que afloran en el río Resina y algunas terrazas remanentes en la Quebrada Humadal. Tiene un espesor entre 1 y 100m, está constituida por depósitos masivos, color gris claro, deleznable y estructura columnar hacia la población de Las Mesas. Estos depósitos tienen mala selección, son matriz soportados, con fragmentos tamaño bloque de pómez fibrosa, blanca y escasos líticos densos y matriz vítreo-cristalina tamaño ceniza. Se presentan restos de carbón. Pardo, et al. (2018) reportan una datación Ar/Ar de edad *plateau* 230.8 ± 13.3 en fragmentos de dacitas anfibólicas y pómez dacíticas. Es interpretada como la acumulación de CDP's concentradas, sin depósitos de caída

14 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

asociados, por descarga de material denso y controlado por la paleotopografía. (Pardo, et al., 2018)

- Formación Montoso Superior (mt_s)

Esta unidad aflora en la vía Las Mesas-Valmaría, luego de que se generara una excavación durante el paso de flujos de escombros ocurridos en los años 2009 y 2014. Son depósitos muy mal seleccionados, masivos, con bloques y megabloques subredondeados en una matriz limo-arcillosa. Predominan dacitas porfíricas grises. Además, se presentan megabloques conglomeráticos en matriz limo-arenosa. Es interpretada como producto de una avalancha de escombros en facies dominio de bloques, resultado del colapso parcial del flanco occidental de Cerro Montoso. (Pardo, et al., 2018)

- Formación La Cruz (Lcr)

Se compone de dos miembros, el Miembro Ciénaga Alta-Alto Sano (lcr_{cas}) y el Miembro Tajumbina (lcr_{taj}), a su vez, el primer miembro se subdivide en tres depósitos, de los cuales el depósito intermedio (lcr_{cas2}) es el que tiene mayor distribución espacial y aflora en la Quebrada Humadal. Predominan los fragmentos subangulares de pómez dacítica, sobre líticos angulares afaníticos y porfíricos, con evidencia de oxidación. El tamaño de los fragmentos es *lapilli* grueso y bloque fino. Se interpreta como un depósito de caída proclástica, con una edad C¹⁴ de 4422±28 yrBP (Pardo, et al., 2016)

- Formación Las Mesas (lm)

Se encuentra en contacto discordante sobre la Formación La Cruz, aflora en terrazas a lo largo de la Quebrada Humadal y la población de Las Mesas. Se compone de tres miembros, interpretados como depósitos de flujos de bloques y ceniza por destrucción parcial o total de domos; sus facies masivas son fracciones concentradas de CDP's y las laminadas, diluidas. El Miembro Las Mesas Inferior presenta capas masivas de fragmentos subangulares de rocas porfíricas tamaño bloque en una matriz lítico-cristalina, con restos de madera carbonizada datada en 3148±75 yr BP (C¹⁴). El Miembro Intermedio tiene una capa basal gruesa masiva, deleznable, mal seleccionada, de fragmentos dacíticos tamaño

bloque y una edad reportada de 3058 ± 93 yr BP. Finalmente, el miembro superior se compone de fragmentos dacíticos, mal seleccionados, tamaño bloque en una matriz lítico-cristalina cubiertos por una capa de ceniza lítico-cristalina (Pardo, et al., 2016)

1.4.3 Geomorfología

La geomorfología del CVDJ ha sido estudiada desde diferentes enfoques y escalas. El Servicio Geológico Colombiano definió para esta área unidades morfogenéticas, usando la sistemática de Carvajal (2012), con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa (SGC, 2014; SGC, 2015). Por otra parte, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2004) implementó para sus estudios agrológicos el enfoque geopedológico de Zinck, *et al.* (2016), que tiene en cuenta criterios fisiográficos y morfogenéticos para entender la relación entre el suelo y el paisaje. Los estudios anteriores son de carácter general. En tanto que, Giraldo-Obando (2012) utilizó una clasificación morfométrica para subdividir el corregimiento de Las Mesas en áreas con diferente grado de inclinación con el fin de determinar la amenaza por fenómenos de remoción en masa. Si bien, las denominaciones de las geoformas son diferentes, coinciden en que el proceso que las genera es el emplazamiento de material volcánico en los valles conformando lóbulos, o terrazas, de baja pendiente, que están limitados por escarpes pronunciados debido a la incisión del drenaje. Estudios más recientes, como el de Villota (2019), resuelven estas diferencias al proponer una denominación genética para las geoformas teniendo en cuenta las unidades litológicas de Pardo, et al. (2018). De esta manera, el sector de Las Mesas es un sistema de lóbulos de flujos piroclásticos de diferentes edades, aterrizados por la acción de procesos epigenéticos. De igual manera, reconoce una tendencia general a que las geoformas volcánicas de origen explosivo y efusivo predominen en las áreas próximas al edificio volcánico, mientras que en las áreas distales se encuentran las denudativas y epiclásticas.

Finalmente, Salazar, et al., (2022) realizan una descripción detallada de las formas del terreno en la Quebrada Humadal (**Figura 1-6**), relacionando los procesos que controlan la evolución del paisaje. Indicando que el proceso principal que modela el paisaje en periodos cortos de tiempo es gravitacional, además, que el grado de incisión sobre una geoforma depende de la competencia del material y el tiempo de exposición. De modo que el paisaje en este caso es un mosaico de unidades superpuestas, como palimpsestos, relacionadas

16 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

a la erosión y a las desestabilizaciones causadas por perturbaciones volcánicas, tectónicas y/o climáticas.

Figura 1-6: Formas del terreno en la Quebrada Humadal. Dle: Ladera erosiva, Slfe: Crestón festoneado, Vlfp: Lóbulo de flujos piroclásticos, Dlres: Lomo residual, Deem: Escarpe de erosión menor



Fuente: Tomado de Salazar, et al. (2022)

Tabla 1-1 Definiciones de unidades geomorfológicas

Símbolo	Nombre	Definición
Deem	Escarpe de erosión menor	Ladera abrupta o a desplome de longitud corta a larga, de forma cóncava o convexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originada por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.
Dle	Ladera erosiva	Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura.
Dlres	Lomo residual	Elevación del terreno menor de 200 metros con morfología alomada y alargada, laderas cortas a moderadamente largas, convexas a eventualmente cóncavas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas y con drenaje dendrítico, desarrollada de manera general sobre materiales afectados por meteorización diferencial intensa.

Sefes	Epolón festoneado	Laderas y crestas simétricas de morfología alomada, cimas agudas, pendiente muy inclinada a muy abrupta, forma recta a cóncava, dispuestas perpendicularmente al rumbo de las estructuras geológicas definiendo salientes cortas y largas. La geoforma está constituida por alternancia de niveles duros y blandos altamente disectados.
Sife	Escarpe de línea de falla	Plano vertical a subvertical corto a muy corto, cóncavo a convexo de pendiente abrupta. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada
Vfpe	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	Ladera casi vertical de longitud y altura variables, de forma cóncava o convexa, presente en los bordes de la superficie de remanentes de un depósito de un flujo piroclástico. Su génesis está asociada a la incisión y socavación de las corrientes hídricas en los depósitos de flujo piroclástico
Vfp	Flujo piroclástico aterrazado	Lóbulo alomado de aspecto tabular y plano (2° a 3°) con escarpes de diferente altura. Localmente se localiza paralelo a los ríos con los que limita, o conformando un abanico. Su génesis está asociada a la acumulación de productos de flujos piroclásticos que van quedando elevados conforme la corriente hídrica va erosionando y recobrando su cauce
Vlfp	Lóbulo de flujo piroclástico	Superficie alomada, con escarpes de diferente altura y laderas de diferentes longitudes. Su génesis se asociada a la denudación y erosión de terrazas de flujos piroclásticos por la incisión de corrientes hídricas y procesos denudacionales, que van labrando y suavizando sus laderas, modelando las formas típicas tabulares de las terrazas a lóbulos.

Fuente: Tomado y modificado de (Carvajal, 2012)

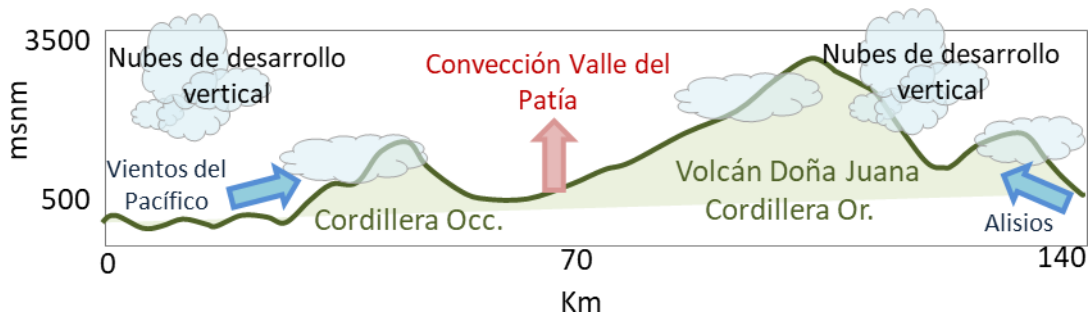
1.4.4 Paleoclima y clima

En Colombia, las variaciones climáticas se han descrito de acuerdo a reconstrucciones paleoecológicas realizadas en algunos sectores de las cordilleras Central (Kuhry, et al., 1983; Salomons, 1989; Thouret, et al., 1996; Velásquez, 2004; Castañeda, 2013) y Oriental (Van Geel & Van der Hammen, 1973; Van der Hammen, et al., 1980/1981; Hooghiemstra, 1984). Los registros palinológicos evidencian los mismos periodos estadiales en la mayoría del país (Velásquez, 2013); sin embargo, la distribución de los períodos secos y húmedos sobre las cordilleras no ha sido homogénea. Algunos autores señalan que esto se relaciona con los cambios en la posición de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Velásquez, 2004; González-Carranza, et al., 2012; Castañeda, 2013; Velásquez, 2013) y la influencia de los vientos húmedos trans-Amazónicos (González-Carranza, et al., 2012). Durante el período comprendido entre los 4000 y 3500 yrBP se observa una tendencia al calentamiento y aumento de la humedad que marca el pico de temperatura del periodo interglaciar actual (Hooghiemstra, 1984) y que disminuye hasta la revolución industrial.

Hoy en día, la posición geográfica del área de estudio la hace un lugar particular. Al estar controlada por la interacción de los vientos Alisios con la Cordillera Central, así como por

la posición latitudinal donde pasa la Zona de Convergencia Intertropical (**Figura 1-7**), genera dos regímenes pluviales. El primer régimen, monomodal se da en la vertiente oriental, mientras que el comportamiento bimodal se da en la occidental. Los rangos de precipitación se encuentran dentro de los 1300 a 2000mm/año (Universidad de Nariño - IIRB Alexander von Humboldt, 2015).

Figura 1-7: Perfil altitudinal de las vertientes del CVDJ y los flujos de masas de aire

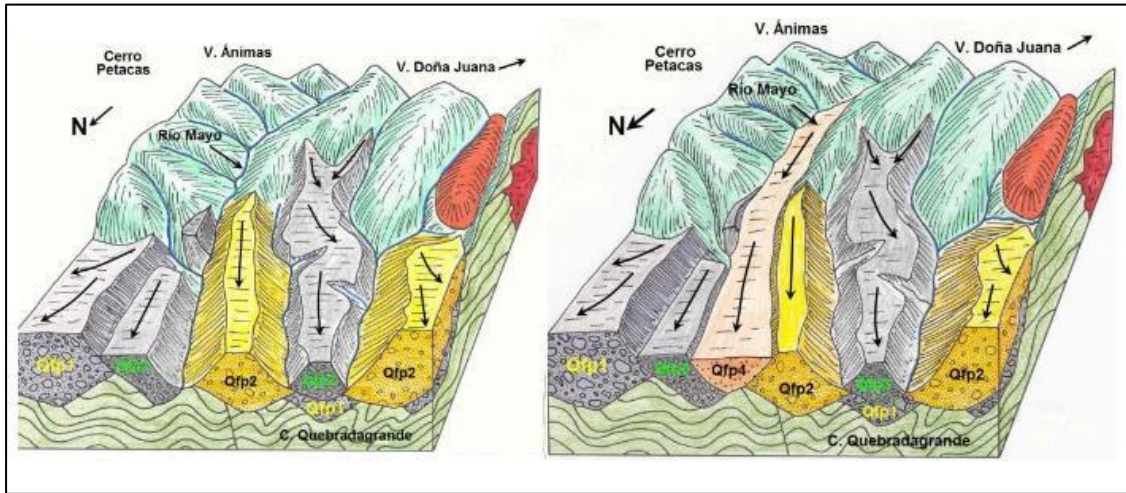


Fuente: Modificado de (Universidad de Nariño - IIRB Alexander von Humboldt, 2015)

1.4.5 Paleosuelos

De acuerdo con Pardo, et al., (2018) la actividad volcánica en el CVDJ comienza hace 1.1 Ma. Esta se caracteriza por ser predominantemente efusiva, en la cual se da lugar al emplazamiento de domos de lava que posteriormente colapsan debido al tectonismo. En este proceso se generan flujos de piroclastos de diferente grado de dilución que recorren los paleovalles de los ríos del sector (**Figura 1-8**) (Navarro, et al., 2009; Naranjo Heano, et al., 2009). Estos depósitos forman lóbulos que, a lo largo del tiempo, se aterrazan favorecidos por los procesos erosivos (Villota, 2019). Sin embargo, la intensidad de la erosión ha variado, por lo cual unidades más antiguas pueden aflorar en los sectores topográficamente más elevados (Pardo, et al., 2018).

Figura 1-8: Emplazamiento de lóbulos de flujos de piroclastos en paleovalles,

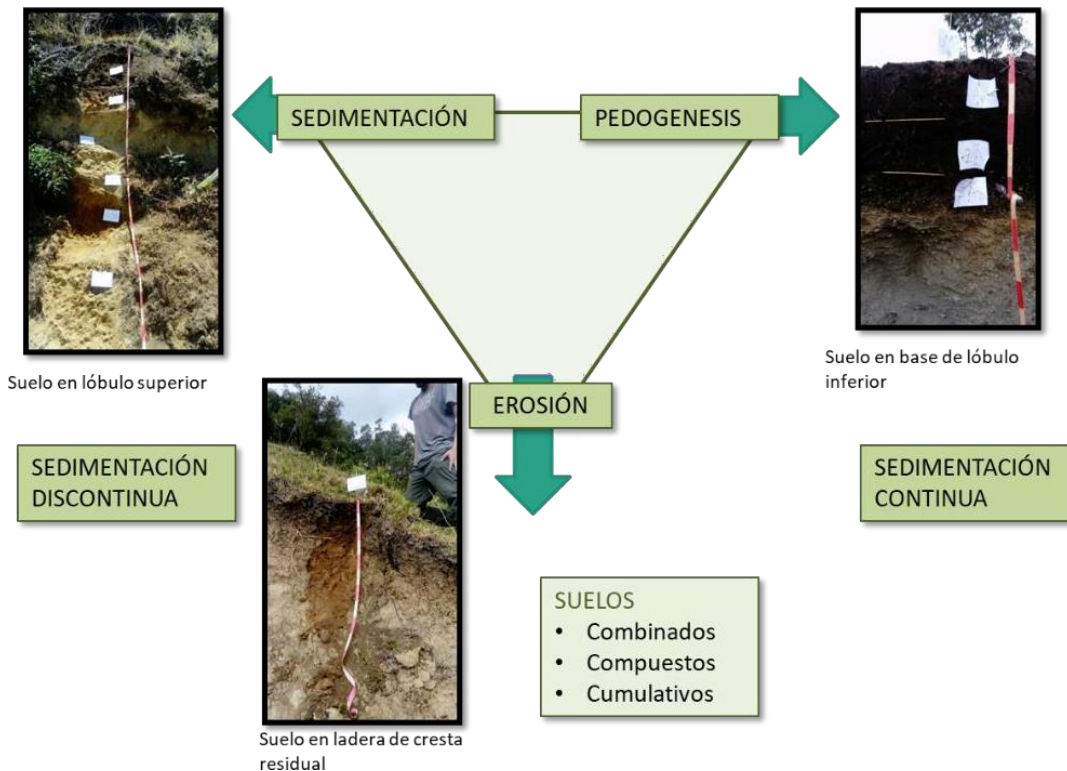


Fuente: Tomado de (Navarro, et al., 2009)

Los procesos de formación del suelo se relacionan a eventos de estabilidad relativa de una superficie (Butler, 1959). Los procesos de erosión, sedimentación y pedogénesis compiten de manera paralela para dar forma al paisaje. Las interacciones de estos procesos pueden dar como resultado la formación de suelos combinados (*compound*), compuestos (*composite*) o cumulativos (*cumulative*) (Kraus, 1999). En la **Figura 1-9** se esquematiza cada proceso en un eje y se presenta el tipo de suelo formado en el área de estudio. Cuando predomina la sedimentación sobre la pedogénesis el grado de desarrollo de suelo es bajo, en este caso se presentan horizontes AB de poco espesor y sepultados por niveles de flujos de piroclastos o depósitos de caída (A). La menor pendiente del relieve en la base del lóbulo piroclástico favorece la pedogénesis, en este suelo los horizontes A son más espesos y oscuros (B). En cambio, cuando los procesos erosivos toman importancia, sólo se presenta un horizonte A, de 20cm y color claro (C).

Figura 1-9: Representación de los procesos que representan la estabilidad del paisaje. A) suelos compuestos en cuerpos de lóbulos piroclásticos antiguos donde predomina la sedimentación discontinua, B) suelos cumulativos donde predomina la pedogénesis y se

tiene sedimentación continua, C) suelos poco desarrollados en zonas de ladera en donde influyen procesos erosivos.



1.5 Métodos

Para entender la génesis de suelos en la Quebrada Humadal se evaluó el contenido taxonómico en la catena y compararon las propiedades morfológicas y analíticas en cada posición geomorfológica. Por otro lado, se realizó una correlación estratigráfica mediante la comparación de niveles de depósitos piroclásticos y posición en el paisaje.

En cuanto al desarrollo de suelos, la clasificación taxonómica de la USDA utiliza características y horizontes diagnóstico. Pese a no estar ligadas a una interpretación genética en su determinación (Smith, 1986), se organizan en jerarquías según una serie de rutas pedológicas, a nivel de Orden, y la actuación imperante de un factor formador a nivel de Suborden (Arnold, 1983). La andolización puede evaluarse en términos de las propiedades ándicas y el grado con el cual se expresan indica la predominancia de este proceso en la formación del suelo (Shoji, et al., 1993). Otras propiedades como el espesor

de los horizontes y contenido de carbono sirven como elementos interpretativos en el modelo pedogenético específico para Andisoles y suelos de alta montaña andina (Malagon-C. & Pulido-R., 2000). Las propiedades ándicas se adquieren a través de la transformación de material mineral y orgánico en materiales amorfos como alófanos, imogolita y complejos metal-humus (Soil Survey Staff, 2014). Se estiman a través del análisis de extracciones químicas selectivas de Fe y Al; retención de fosfatos, por el método de (Bray II) Bray & Kurtz (1945); densidad aparente, por el método del cilindro; contenido de CO por digestión en húmedo (Walkley & Black, 1934) y porcentaje de vidrio volcánico en la fracción arena.

1.5.1 Fase de campo

Los puntos para las calicatas se seleccionaron de acuerdo con la información geomorfológica presentada por Villota (2019) y la geología de Pardo, *et al.*, (2018). De este modo se abarcaron varios lóbulos de flujos de piroclastos en diferentes posiciones geomorfológicas.

Los perfiles se describieron acorde con los parámetros establecidos en el Soil Survey Manual (Soil Science Division Staff, 2017) y clasificados con la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014). Se tomaron muestras disturbadas de suelo por cada horizonte para realizar análisis de caracterización fisicoquímica y, de manera similar, se recolectaron muestras sin disturbar en cilindros de 5x5cm.

1.5.2 Fase de laboratorio

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de suelos y aguas de la Universidad Nacional de Colombia y el Laboratorio Nacional de suelos del IGAC (IGAC, 2006). Las características diagnóstico determinadas fueron: textura, por el método de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986); CO por digestión en húmedo (Walkley & Black, 1934); bases intercambiables y CIC, mediante una extracción en acetato de amonio 1N a pH 7 (IGAC, 2006); acidez intercambiable con cloruro de bario y tetranolamina a pH 8.2; pH, medido con potenciómetro (827pH Lab Metrohm ®) sobre una pasta de suelo-agua con relación 1:1 (IGAC, 2006). La densidad aparente se hizo por el método del cilindro. Para las propiedades ándicas, se estimaron: el índice melánico a partir del color (Honna, et al., 1988), la retención de fosfatos (Bray II) (Bray & Kurtz, 1945) y extracciones selectivas de

Al y Fe con pirofosfato de sodio 0.1M a pH 10 (Smith, 1994), extracción de Fe y Al con oxalato amónico 0.2M a pH 3 (Blakemore, et al., 1981) y ditionito-citrato-bicarbonato 0.5M (Holmgren, 1967). Las mediciones se hicieron en un espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer SpectrAA-Pin AAcle 900T®) del Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

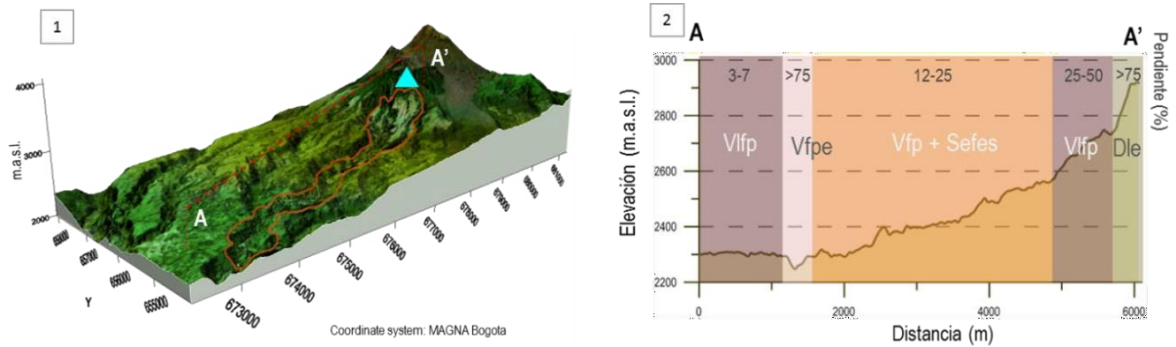
1.5.3 Fase de análisis

Las variables se organizaron de acuerdo con los índices de desarrollo propuestos por Harden (1982) y Walker & Green (1976), para variables morfológicas y fisicoquímicas respectivamente. Estos índices fueron luego comparados individualmente con la edad de la superficie geomorfológica, la distancia al edificio volcánico y la capacidad de acumular materia orgánica. Para facilitar la comparación de variables se realizó un análisis de componentes principales, asumiendo que los índices de desarrollo pueden agruparse en el factor “grado de desarrollo”; la distancia al edificio volcánico, la edad de las superficies geomorfológicas, así como el tiempo de exposición, y en un tercer factor que indica el carácter ándico y la capacidad de acumular materia orgánica.

1.6 Resultados

La cuenca de la Quegrada Humadal se caracteriza por sus pendientes contrastantes, asociadas a los planos de los lóbulos y escarpes. En la **Figura 1-10** se describen los sistemas geomorfológicos con las formas del terreno predominantes. El primer tramo se relaciona a las partes altas, donde se encuentra el Cerro Montoso, en el que predominan las laderas erosivas (Dle) y los lóbulos piroclásticos (Vlfp) de los depósitos más antiguos; en el tramo medio son representativos los flujos piroclásticos aterrazados (Vfp) y, además, existe un control estructural sobre el basamento aflorante por lo que se encuentran espolones festoneados (Sefes); finalmente, en el tramo bajo de la cuenca se observan los lóbulos piroclásticos relacionados a la Formación Las Mesas, evidenciando una topografía plana (Vlfp).

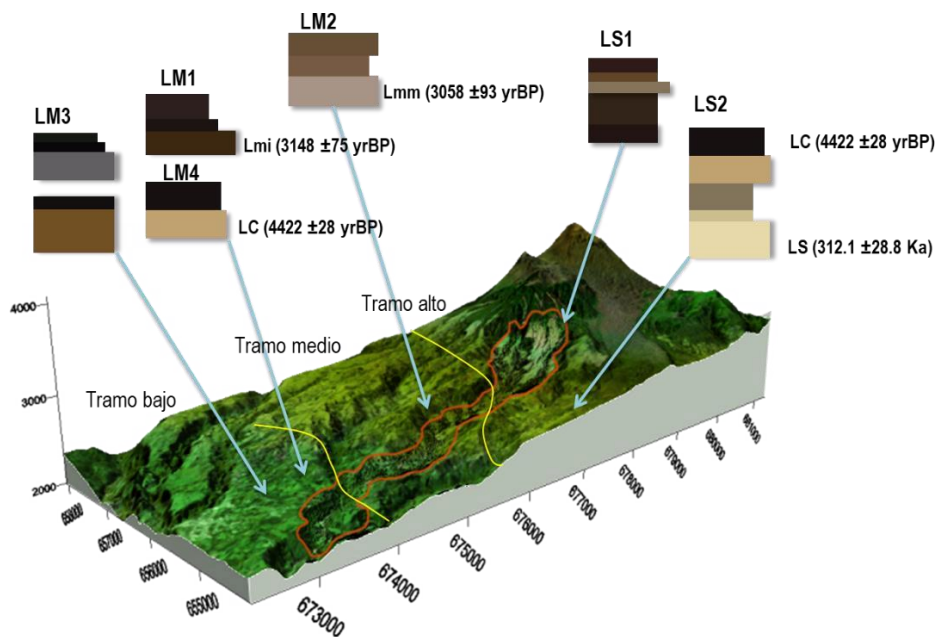
Figura 1-10: Perfil topográfico y geoformas asociadas a la catena de la Quebrada Humadal. Dle: Ladera erosiva, Slfe: Crestón festoneado, Vlfp: Lóbulo de flujos piroclásticos, Dlres: Lomo residual, Deem: Escarpe de erosión menor.



Fuente: Tomado y modificado de (Salazar, et al., 2022)

La presencia de suelos se restringe a las zonas con menor pendiente. En los escarpes de los lóbulos piroclásticos y en las laderas pronunciadas, el suelo tiende a ser muy delgado o inexistente. Los perfiles en el tramo alto de la cuenca son espesos, poligenéticos y se relacionan a los depósitos más antiguos ($312.1 \pm 28.8 \text{KyrBP}$) (Pardo, et al., 2016). En el tramo medio, los suelos tienen horizontes espesos, pero con un bajo contenido de materia orgánica y, generalmente, material parental rejuvenecido por depósitos coluviales recientes. El tramo bajo presenta los suelos con perfiles más diferenciados y colores más oscuros, los paleosuelos de este sector están bien preservados y se encuentran sepultados por varios metros de depósitos piroclásticos (**Figura 1-11**).

Figura 1-11: Catena de la Quebrada Humadal. LS: Formación Lomaseca, LC: Formación La Cruz, Lmi: Formación La Mesa Miembro Inferior, Lmm: Formación La Mesa Miembro Intermedio.



1.6.1 Pedología

Los rasgos morfológicos y analíticos del suelo permiten evaluar la intensidad de los procesos específicos que determinan la ruta pedológica de cada perfil. De esta manera se identificaron episodios de pedogénesis dentro de la estratigrafía y sus características. El material parental de origen volcánico imprime una direccionalidad hacia la andolización. Sin embargo, como será descrito más adelante, los factores formadores intervienen para producir variedades de suelo dentro del orden de los Andisoles e Inceptisoles ándicos en la taxonomía USDA (Soil Survey Staff, 2014) y variedades aluándicas, silándicas y melánicas del grupo de suelo de referencia de los Andosoles en el sistema de clasificación de la WRB (FAO, 2015).

En la **Tabla 1-2** se resumen las propiedades morfológicas y fisicoquímicas de cada horizonte para los perfiles evaluados. En general, predominan las texturas gruesas y francas en todos los perfiles. El color va de pardo oscuro a negro en los horizontes A superficiales y sepultados, directamente relacionado con el %CO, que es medio. La densidad aparente es menor a 0.9 g/cm^3 en todos los casos, condicionada por la textura arenosa de los horizontes. El indicador de presencia de alófanas, o complejos Al-humus,

para texturas gruesas, se estima con las extracciones de Al y Fe en oxalato y el porcentaje de vidrio volcánico $((Al_0+0.5Fe_0)*15.625+\%Vidrio)$ y tiene un valor de corte de 36.25% en la taxonomía USDA, para diferenciar Inceptisoles vitricos ándicos de Andisoles vitricos (Soil Survey Staff, 2014).

Tabla 1-2 Propiedades morfológicas y fisicoquímicas para los horizontes

Muestra	E (cm)	Textura	Color Matriz	Dap (g/cm ³)	CIC (cmol c/Kg)	CO (%)	(Al ₀ +0.5Fe ₀)*15.625+%Vidrio)	Ret. Fosfórica (%)	Alp/Al ₀	Subgrupo USDA	Grupo de suelo de referencia FAO
LS1 Ap	12	FarA	5YR 3/4	-	33.8	8.09	31.6	39.05	0.72	<i>Andic Dystrudept'/ Dystric Melanudand</i>	<i>Dystric Andosol (Epivitríc, Endoandic, Epialuandic, Endosilandic, Endomelanic)</i>
LS1 Bg	12	AF	10YR 3/4	0.45	17.7	1.74	29.2	-	-		
LS1 C	8	A	10YR 5/4	0.55	-	-	-	-	-		
LS1 2Abg1	38	FarA	10YR 2/2	0.37	24.9	3.58	50.9	93.11	0.40		
LS1 2Abg2	30	FarA	10YR 2/2	-	-	3.16	47.6	83.63	0.37		
LM1 Ap	23	Farg	10YR 3/2	0.42	30.7	3.17	33.8	50.75	0.69	<i>Vitrándic Dystrudept</i>	<i>Dystric Aluandic Vitric Andosol (Loamic, Endoskeletalic)</i>
LM1 2Ab	18	Farg	10YR 2/2	0.37	38.9	3.33	38.7	57.54	0.65		
LM1 2C	57	A	10YR 6/3	-	-	1.52	-	-	-		
LM2 Ap	27	Ag	10YR 3/4	-	32.5	5.19	31.9	38.12	0.50	<i>Vitrándic Dystrudept</i>	<i>Dystric Aluandic Vitric Andosol (Arenic, Colluvic, Endoskeletalic)</i>
LM2 2Bg	29	Fag	7.5YR 4/6	-	-	1.51	-	-	-		
LM2 3BCbg	44	FarAg	10YR 3/2	0.48	-	2.58	-	-	-		
LM3.2 Ap	27	FarAg	5YR 3/2	0.46	23.3	3.28	34.4	56.49	0.76	<i>Vitrándic Dystrudept</i>	<i>Dystric Aluandic Vitric Andosol (Loamic, Endoskeletalic)</i>
LM3.2 AB	33	FarAg	7.5YR 2.5/2	0.39	20.5	2.26	34.1	63.86	0.68		
LM3.2 C	40	FarAg	7.5YR 5/3	-	-	-	-	-	-		
LM4 Abb	51	ArF	5YR 2.5/1	0.30	28.3	2.73	57.4	87.49	0.34	<i>Typic Vitraquand</i>	<i>Dystric Silandic Andosol (Relictigleyic, Loamic, Melanic, - thixotropic?)</i>
LM4 Bbg	50	FarA	10YR 5/3	0.31	35.6	0.47	-	-	-		
LM4 2Cg	50	Ag	10YR 6/8, 7.5YR 5/8, 7.5YR 3/3	-	-	-	-	-	-		
LS2Ap	32	Ag	10YR 2/1	0.33	30.4	16.05	48.2	88.31	0.82	<i>Vitric Melanudand</i>	<i>Dystric Aluandic Vitric Andosol (Protoandic, Arenic)</i>
LS2 C	68	GA	10YR 7/6	-	-	2.36	-	-	-		
LS2 2Ab1	18	FarA	10YR 2/2	0.24	8.3	0.55	81.3	98.03	0.09	<i>Thaptic Udivitrand</i>	<i>Dystric Silandic Andosol (Arenic, Melanic)</i>
LS2 2Ab2	50	FarAg	10YR 2/1	-	35.6	3.46	87.3	98.03	0.23		
LS2 2BC	26	Fg	10YR 4/4	-	-	1.65	-	-	-		
PCLM3 A	38	Ag	10YR 3/3	0.39	-	4.97	40.4	73.1	0.49	<i>Thaptic Udivitrand</i>	<i>Dystric Silandic Vitric Andosol (Arenic, Protoandic, Endoskeletalic, Endoaluandic)</i>
PCLM3 2Ab	10	Ag	10YR 2/2	-	18.2	6.71	43.8	85.15	0.50		
PCLM3 2C	51	Ag	10YR 5/4	-	-	0.74	-	-	-		

E: Espesor

26 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

Textura: F: Franco, A: Arenoso, Ar: Arcilloso, L: Limoso, g: Grava (guijo), G: Grava (bloque)

Dap: Densidad aparente

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

Propiedades Ándicas: $(Al_0+0.5Fe_0)*15.625+\%Vidrio$ (extracciones de oxalato)

Alp/Alo: Relación de extracción de Al en pirofosfato y oxalato. Indica el carácter silándico o aluándico.

¹ Se clasifica el suelo sepultado debido a que el manto de suelo (Ap-Bg-C) tiene menos de 50cm, o la mitad del espesor de horizontes sepultados (Soil Survey Staff, 2014).

En el caso del sistema de clasificación WRB el valor de corte para las propiedades ándicas es de 2% ($Al_0+0.5Fe_0$), y 0.4% en el caso de propiedades vítricas más un porcentaje de vidrio volcánico superior al 5% (FAO, 2015). La relación de aluminio acomplejado con la materia orgánica (Alp), extraído con pirofosfato de sodio, y de aluminio en materiales amorfos (Alo), extraído con oxalato de amonio, indica el tipo de andolización aluándica y silándica cuando es mayor o menor a 0.5, respectivamente. Este carácter se relaciona al material amorfo que predomina, los complejos Al-humus o las alófanos.

- Suelos del tramo alto de la cuenca

Son suelos que se relacionan a lóbulos piroclásticos pleistocénicos de la Formación Lomaseca. Están compuestos por depósitos de DCP's cubiertos por caídas piroclásticas. En el estudio general de suelos, para este tramo, reportan la consociación dominada por *Acrudoxic Melanudand* y *Acrudoxic Hapludand* (IGAC, 2004). En el caso del perfil LS2, se trata de un paleosuelo color pardo suprayacido por la Formación La Cruz en el que se desarrolla el suelo actual de color negro. En la **Figura 1-12** se muestran los contrastes entre las fracciones gruesa y fina, así como los contenidos de carbono orgánico que permitieron distinguir ambas sucesiones de suelo y los depósitos dentro del perfil. Las características diagnóstico permiten clasificar al perfil superficial como *Vitric Melanudand* con un 60% del volumen del perfil con propiedades ándicas; régimen de humedad údico; un epipedón melánico y con un contenido de vidrio volcánico mayor al 5%; además, tiene carácter aluándico. El paleosuelo se puede clasificar como *Thaptic Udivitrand*, debido a que presenta propiedades ándicas en más del 60%, posee más del 5% de vidrio volcánico; régimen de humedad údico y carácter silándico. Estas características se sintetizan mejor en la clasificación de la WRB, *Dystric Aluandic Vitric Andosol (Protoandic, Arenic) sobre Dystric Silandic Andosol (Arenic, Melanic)*.

Dentro del mismo tramo se encuentra el perfil LS1, que es de tipo compuesto. Los primeros horizontes corresponden a un depósito de caída reciente, que suprayace a la Formación Lomaseca. Los contrastes morfológicos de textura y distribución irregular de carbono orgánico en el perfil señalan un periodo de pedogénesis anterior, al cual se relaciona el horizonte 2Abg (**Figura 1-13**). Se clasifica como un *Andic Dystrudept* debido a que no alcanza el 60% del volumen con propiedades ándicas. Tiene régimen de humedad údico y una saturación de bases menor al 60%; en este caso se clasifica el suelo sepultado debido al poco espesor del manto de suelo suprayacente. En cambio, la clasificación WRB permite describir esta condición a través del prefijo Endo- para referirse a características en profundidad *Dystric Andosol* (*Epitric, Endoandic, Epialuandic, Endosilandic, Endomelanic*).

Figura 1-12: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LS2.

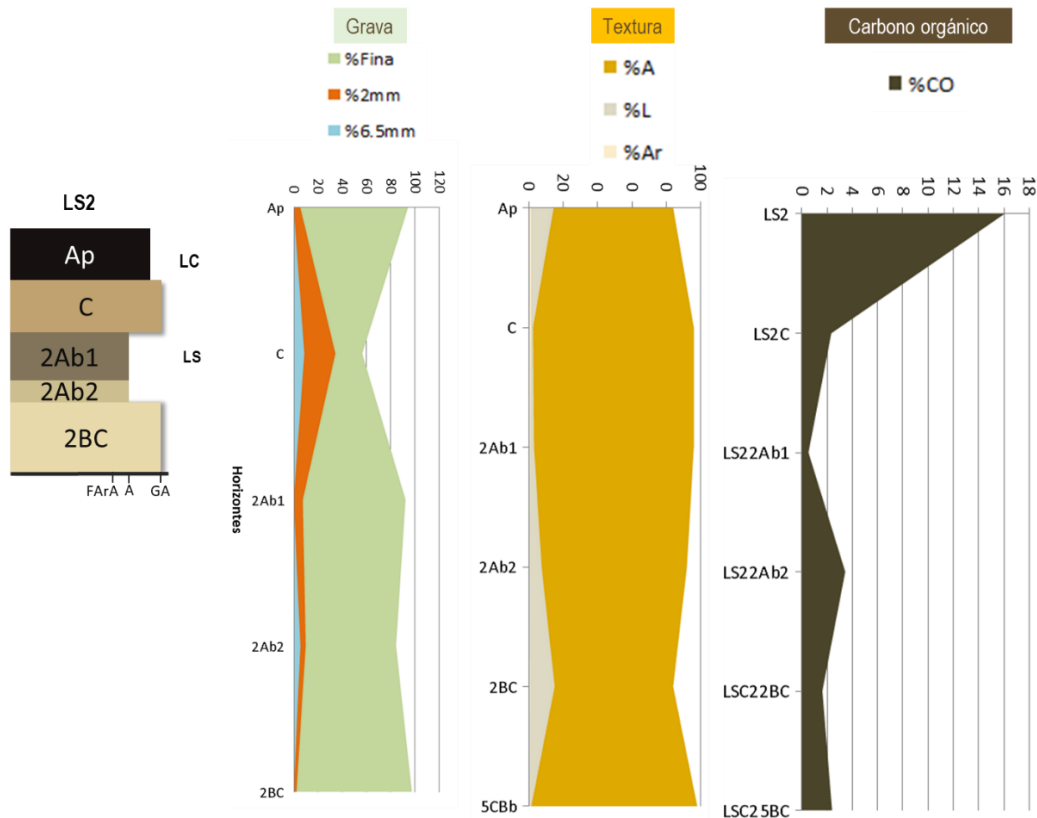
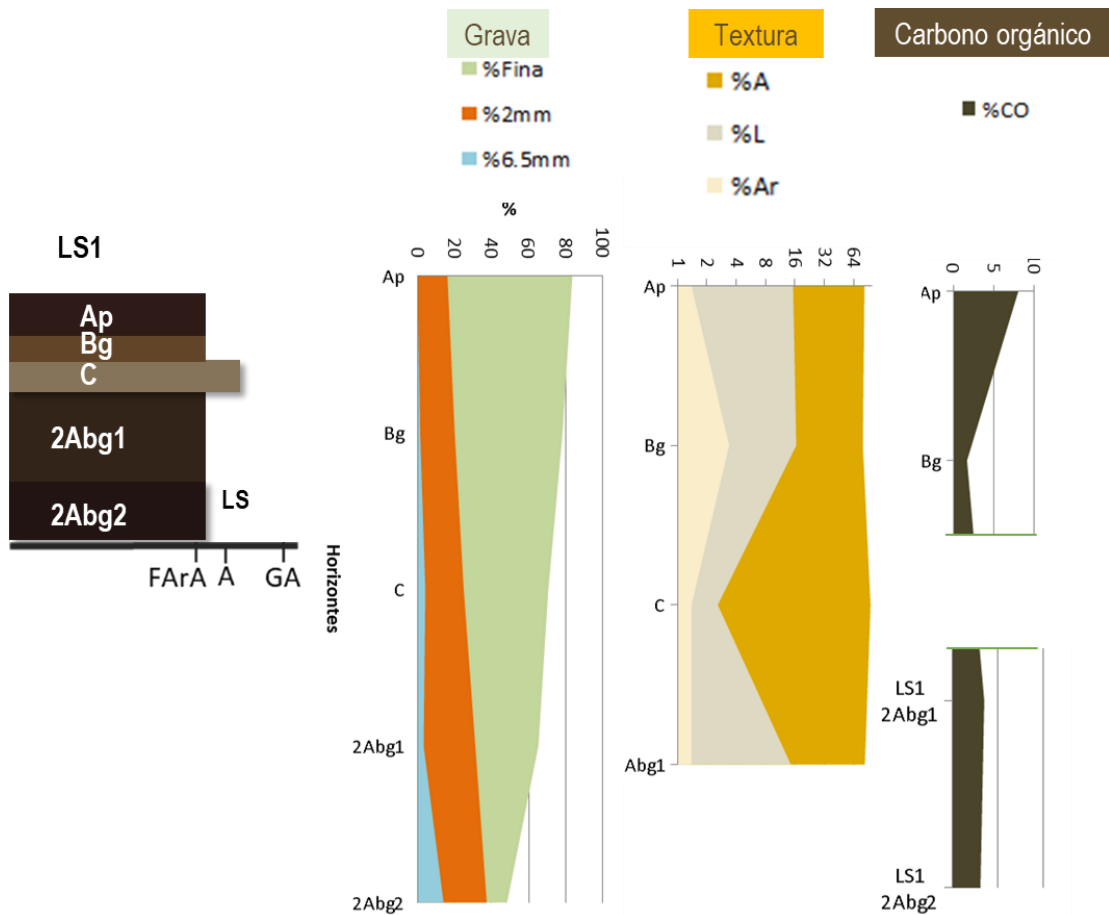


Figura 1-13: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LS1

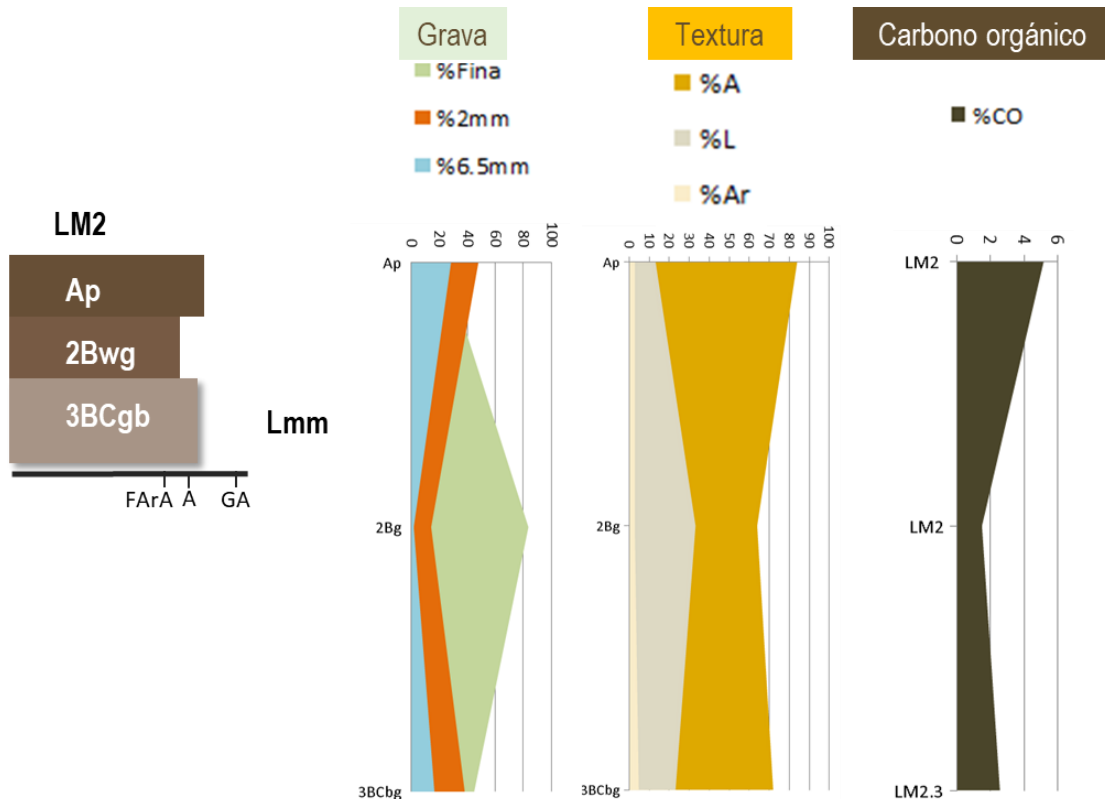


- Suelos del tramo medio de la cuenca

Este sector cubre los planos y escarpes de lóbulos piroclásticos aterrizados, confinados en un valle estrecho limitado por laderas erosivas escarpadas constituidas por el Complejo Quebradagrande. Son comunes los fenómenos de remoción en masa que forman conos de detritos sobre los planos de lóbulos. En el estudio general de suelos, para este tramo, reportan la consociación dominada por *Acrudoxic Melanudand* y *Acrudoxic Hapludand* (IGAC, 2004). El perfil LM2 muestra un proceso de cumulización y rejuvenecimiento por la adición de material depositado por fenómenos de remoción en masa (**Figura 1-14**). En su fracción gruesa se presentan fragmentos de rocas máficas del Complejo Quebradagrande. En general, este tramo posee suelos de moderado grado de desarrollo *Vitrandic Dystrudept*, un Inceptisol con perfil Ap-Bwg, con moteados asociados al saprolito. El

régimen de humedad es údico; saturación de bases menor al 60% y con un contenido de vidrio volcánico mayor al 5%. Según la clasificación WRB es un *Dystric Aluandic Vitric Andosol (Arenic, Colluvic, Endoskeletal)* que permite enfatizar el origen coluvial de la parte superior del perfil y la presencia de bloques en la parte inferior.

Figura 1-14: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LM2



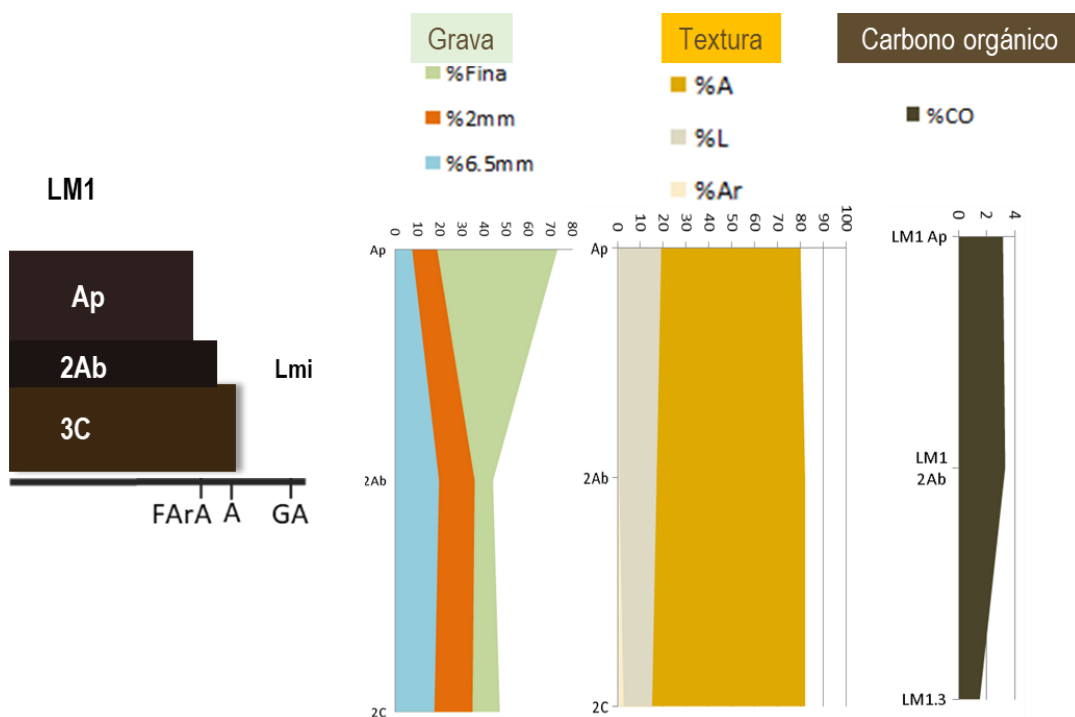
- Suelos del tramo bajo de la cuenca

Esta parte de la cuenca se caracteriza por presentar una topografía plana. Corresponde a la parte distal de los lóbulos de la Formación Las Mesas. Los suelos tienen un horizonte A espeso, de color negro, compuesto por varios depósitos de caída (**Figura 1-15**). En el estudio general de suelos, para este tramo, reportan la consociación dominada por *Humic Udivitrand* (IGAC, 2004). El perfil actual es clasificado como *Vitrándic Dystrudept*. Además, los paleosuelos que se encuentran separados por el miembro intermedio de la Formación Las Mesas tienen un horizonte A color pardo y un horizonte B pardo con moteados rojizos

y textura arenosa. En la clasificación WRB el perfil corresponde a un *Dystric Andosol* (*Epivitríc, Endoandic, Epialuandic, Endosilandic, Endomelanic*) que da cuenta del proceso de cumulización.

El perfil LM4, más desarrollado, se clasifica como un *Typic Vitracuand*, debido a que presenta propiedades ándicas en más del 60% del perfil, un régimen de humedad ácuico evidenciado en los moteados y corresponde al término central del subgrupo. En la clasificación WRB es un *Dystric Silandic Andosol* (*Relictigleyic, Loamic, Melanic*) que permite presentar la condición relicta de los moteados.

Figura 1-15: Fracción gruesa (>6.5mm, 6.5mm-2mm y fracción fina <2mm), textura y contenido de Carbono Orgánico para el perfil LM1



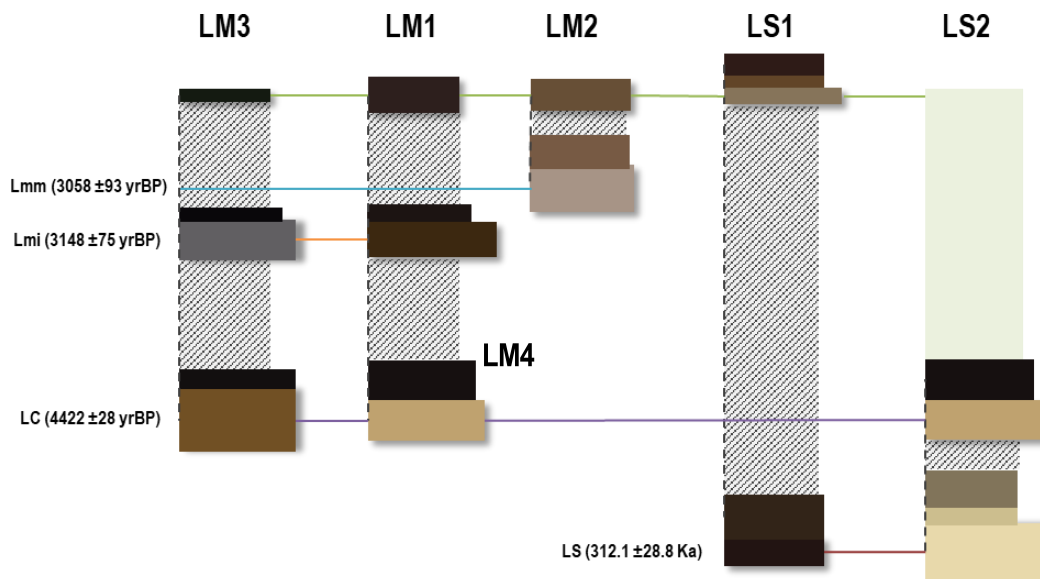
1.7 Interpretación y discusión

1.7.1 Correlaciones estratigráficas

La correlación estratigráfica sigue la nomenclatura y cronología presentada por Pardo, *et al.* (2018). Utilizando las relaciones geomorfocronológicas, las características

morfológicas, físicoquímicas y diagnóstico, se presenta la correlación pedoestratigráfica en la **Figura 1-16**. Se reconocen cuatro unidades correspondientes a las formaciones Lomaseca (LS), La Cruz (LC), Las Mesas, miembro intermedio (Lmm) y miembro inferior (Lmi), y erupciones históricas. Los lóbulos de la Formación Lomaseca, se encuentran en la parte alta limitando el valle de la quebrada. Por otro lado, los lóbulos aterrazados de la Formación Las Mesas se emplazan adosados al valle, de modo que las terrazas más jóvenes se encuentran en alturas relativas más altas y hacia la cabecera de la quebrada.

Figura 1-16: Correlaciones pedoestratigráficas para los perfiles trabajados

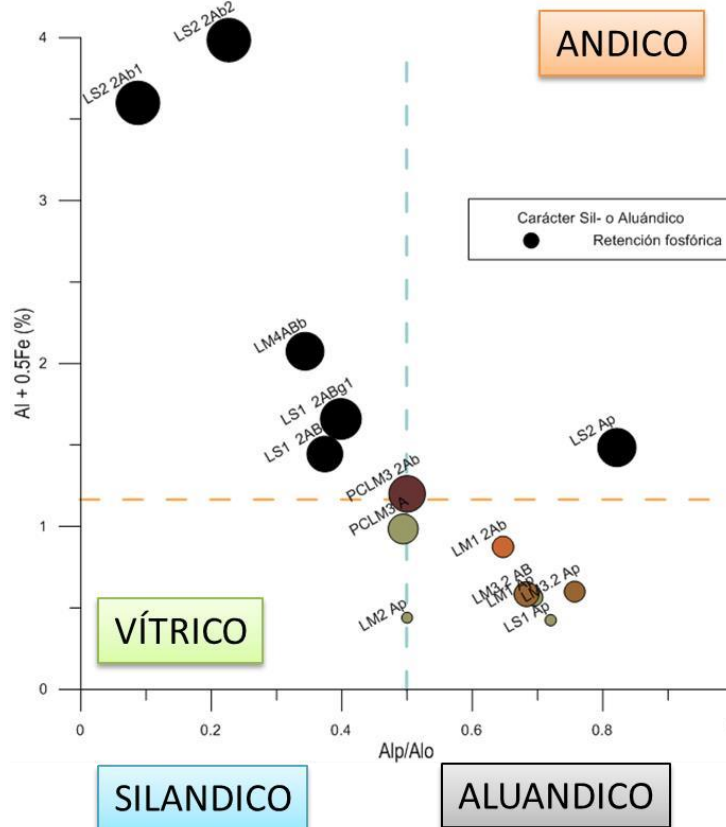


1.7.2 Procesos pedológicos

El proceso que caracteriza a la andolización es la formación de materiales no cristalinos y la acumulación de materia orgánica (Shoji, et al., 1993). El tipo de material, ya sean complejos Al-humus o alófanos/imogolita puede diferenciarse utilizando los indicadores propuestos por Shoji, *et al.* (1996). En la **Figura 1-17** se muestran las relaciones de $Al_{ox}+0.5Fe_{ox}$, que representa el grado de meteorización de vidrio volcánico, y la relación Al_p/Al_o que refleja el carácter silándico (alofánico) o aluándico (Al-humus) de cada horizonte. Para este caso, los horizontes sepultados presentan propiedades ándicas mejor definidas y un carácter silándico. Caso particular es el del horizonte LS2 Ap, que corresponde a una superficie antigua expuesta, y tiene carácter aluándico y alto contenido

de materiales amorfos. Por otro lado, los horizontes superficiales relacionados a depósitos de caída recientes tienden a presentar menos material amorfo y un carácter aluándico;

Figura 1-17: Carácter ándico de los horizontes estudiados



Respecto a las dos tendencias evidenciadas, desarrollo silándico o aluándico, Johnson, *et al.*, (1990) señalan el carácter poligenético de los suelos y su capacidad de complejizarse a lo largo del tiempo. En particular, el perfil LS2 presenta un cambio de tendencia en horizontes sepultados (LS2 2Ab1 y 2Ab2) con un alto grado de desarrollo de propiedades ándicas de carácter silándico. Se da un cambio a un moderado desarrollo de propiedades ándicas, con un carácter aluándico en el horizonte expuesto. En este sentido, la ruta pedogenética puede estar siendo alterada por factores externos, como un cambio de cobertura y uso, o hacer parte de un continuo vítrico-silándico a ándico-silándico, si se tiene en cuenta el comportamiento de los horizontes sobre depósitos más recientes que también exhiben un carácter aluándico. Estas rutas complejas responden a procesos

regresivos y progresivos actuando en simultáneo, que pueden resultar en comportamientos caóticos (Phillips, 1993).

1.7.3 Desarrollo de suelo

Para explicar la relación suelo-paisaje se utilizaron los índices de desarrollo de Harden (*IPA, Index of Profile Anisotropy*) (1982) para las propiedades morfológicas y de Walker & Green (1976), modificado por Birkeland (1984) (*mPDI, modified Profile relative Development Index*), para las propiedades analíticas. Estos índices se calcularon para los horizontes superficiales, y se sumaron para obtener un único valor (TI) (**Tabla 1-3**).

El índice de Harden (1982) se estima a partir de 7 pasos que buscan calificar y normalizar las propiedades morfológicas para identificar procesos específicos como rubefacción, empardecimiento, oscurecimiento o melanización: 1) Obtener descripción detallada del perfil de suelo 2) Utilizar el material parental como referencia 3) comparar el valor de la propiedad con el valor original para el material parental por horizonte y calcular la diferencia, asignando un valor de 1 a 10 de forma arbitraria 4) Los valores de las diferencias se normalizan en una escala de 0 a 1 al dividirlos por la máxima diferencia de la propiedad en los perfiles considerados 5) multiplicar este valor por el espesor en centímetros del horizonte y sumar todos los valores para un mismo perfil 6) Si todos los valores normalizados se suman y dividen por el número total de propiedades considerados, se obtiene el índice morfológico combinado por horizonte 7) Al multiplicar el valor anterior por el espesor de cada horizonte y sumándolo se obtiene el índice morfológico por perfil de suelo.

En el caso de las propiedades analíticas se usó la ecuación (1):

$$mIPA = \frac{D}{PM} \quad (1)$$

Donde, D es la diferencia de la propiedad analítica respecto a la del material parental y PM es el valor de la propiedad en el material parental. Posteriormente se realiza el proceso de normalización igual que en el índice morfológico, para cada propiedad por horizonte (pasos 4 a 6).

34 USO DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA SENSIBILIDAD DEL PAISAJE EN
EL COMPLEJO VOLCÁNICO DOÑA JUANA (CVDJ), COLOMBIA.

Tabla 1-3 Índices de desarrollo para propiedades morfológicas y físicoquímicas

Muestra	Espesor (cm)	IPA -C	IPA-PA	IPA -RP	IPA(q)	PDI(m)	TI
LS1 Ap	12	6.05	1.28	4.78	4.0	26.00	30.032
LS1 Bg	12	1.30	1.76	5.98	3.0	7.45	10.470
LS1 2ABg1	38	8.48	15.83	36.09	20.1	23.27	43.405
LS1 2ABg2	30	5.91	10.88	25.59	14.1	18.73	32.851
LM1Ap	28	5.53	3.97	14.50	8.0	14.09	22.084
LM1 2Ab	18	3.73	3.95	10.57	6.1	7.65	13.731
LM2 Ap	27	8.73	2.98	10.50	7.4	16.85	24.257
LM2 2Bg	19	1.79	2.17	6.82	3.6	12.15	15.742
LM2 3BCbg	30	4.82	2.94	11.88	6.5	18.39	24.937
LM3 Ap	27	6.61	4.07	15.56	8.7	15.27	24.019
LM3 AB	33	6.74	4.84	21.50	11.0	22.81	33.837
LM4ABb	51	8.67	26.56	45.52	26.9	35.27	62.182
LM4 Bbg	50	1.46	31.87	47.31	26.9	17.03	43.908
LS2 Ap	32	32.00	11.92	28.83	24.3	17.78	42.028
LS2 2Ab1	18	2.65	16.26	18.00	12.3	6.18	18.485
LS2 2Ab2	50	1.71	50.00	50.00	33.9	24.75	58.659
PCLM3 A	38	11.77	9.39	28.34	16.5	17.57	34.071
PCLM3 2Ab	10	4.18	3.01	8.69	5.3	5.41	10.701

IPA-C: Index of Profile Anisotropy para contenido de Carbono Orgánico

IPA-PA: Index of Profile Anisotropy para Propiedades Ándicas

IPA-RP: Index of Profile Anisotropy para Retención Fosfórica

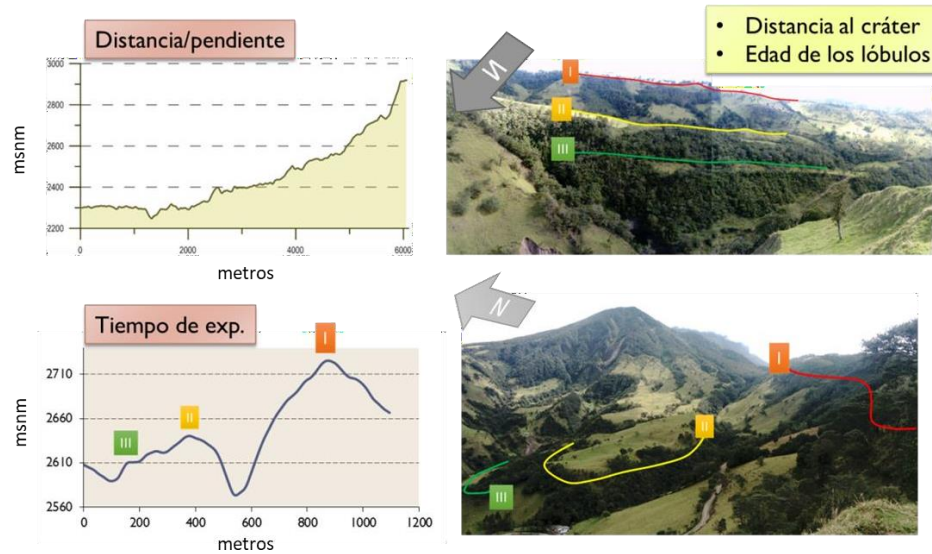
IPA(q): Index of Profile Anisotropy para el total de las propiedades químicas

PDI(m): Profile relative Development Index para el total de las propiedades morfológicas

TI: Índice de desarrollo total PDI(m)+IPA(q)

Los índices de desarrollo se contrastaron con la distancia al edificio volcánico, el tiempo de exposición (**Figura 1-18**), el carácter ándico y contenido de materia orgánica. El tiempo de exposición es la diferencia entre la edad del material sobre el que se desarrolla el suelo y la del que lo suprayace. En el caso de las superficies expuestas la diferencia de edad es respecto al presente.

Figura 1-18: Variables del paisaje a considerar, distancia al edificio volcánico y tiempo de exposición.



Se construyó un modelo del sistema utilizando el análisis de componentes principales en el *software* SPSS. Este modelo tiene una adecuación moderada según la prueba de KMO y Bartlett, y rechaza la hipótesis de similitud (**Tabla 1-4**). En la **Tabla 1-5** se muestra la varianza explicada por cada componente generado, acumulando el 83,3% en los primeros tres factores. Para estos tres factores se genera la matriz de componente rotado con los índices de cada variable **Tabla 1-6**. De estos tres factores significativos, el primero, representa el grado de desarrollo, su variabilidad está explicada por los índices de desarrollo (**Figura 1-19**). El segundo factor es la distancia al edificio volcánico, y el tercer factor la capacidad de acumular materia orgánica (**Figura 1-20**).

Tabla 1-4: Pruebas de ajuste del modelo de componentes

Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0,703
Prueba de esfericidad de Aprox. Chi-cuadrado		113,371
Bartlett	gl	36
	Sig.	0,000

Tabla 1-5: Varianza total explicada

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,594	51,039	51,039	4,594	51,039	51,039
2	1,543	17,145	68,184	1,543	17,145	68,184
3	1,363	15,142	83,326	1,363	15,142	83,326
4	0,670	7,443	90,769			
5	0,327	3,633	94,402			
6	0,214	2,374	96,776			
7	0,198	2,201	98,977			
8	0,055	,614	99,591			
9	0,037	,409	100,000			

Tabla 1-6: Índices por variable dentro del componente rotado

	Matriz de componente rotado^a		
	Componente		
	1	2	3
IPA-PA	0,872	0,140	0,230
Prof	0,871	-0,153	0,053
Edad	0,869	0,176	-0,239
IPA -RP	0,830	0,410	0,299
Almo/Alamorfo	-0,819	0,369	-0,215
Ln edad	0,792	0,022	-0,527
IPA -C	-0,173	0,889	-0,126
PDI(m)	0,482	0,644	0,222
Distancia	0,090	-0,012	0,890

Figura 1-19: Biplot variables en componentes 1 y 3

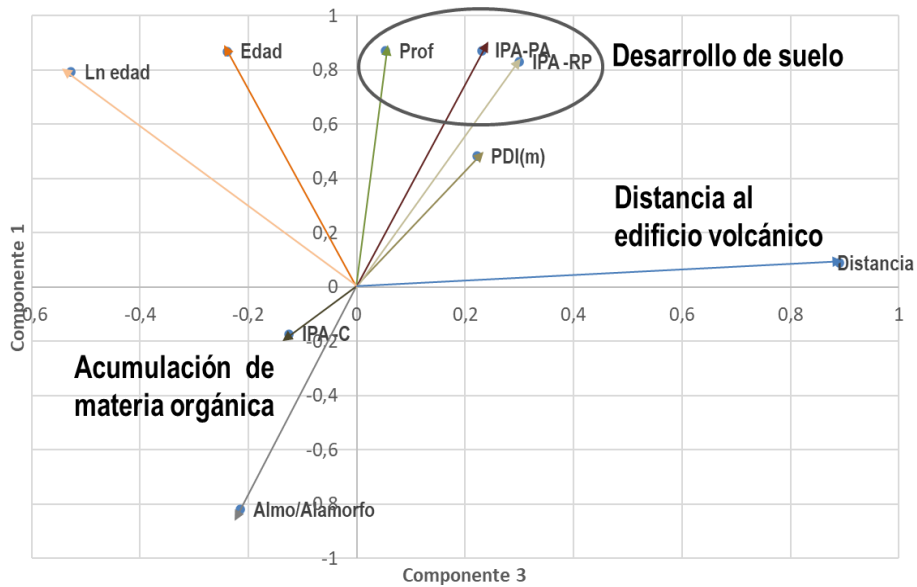
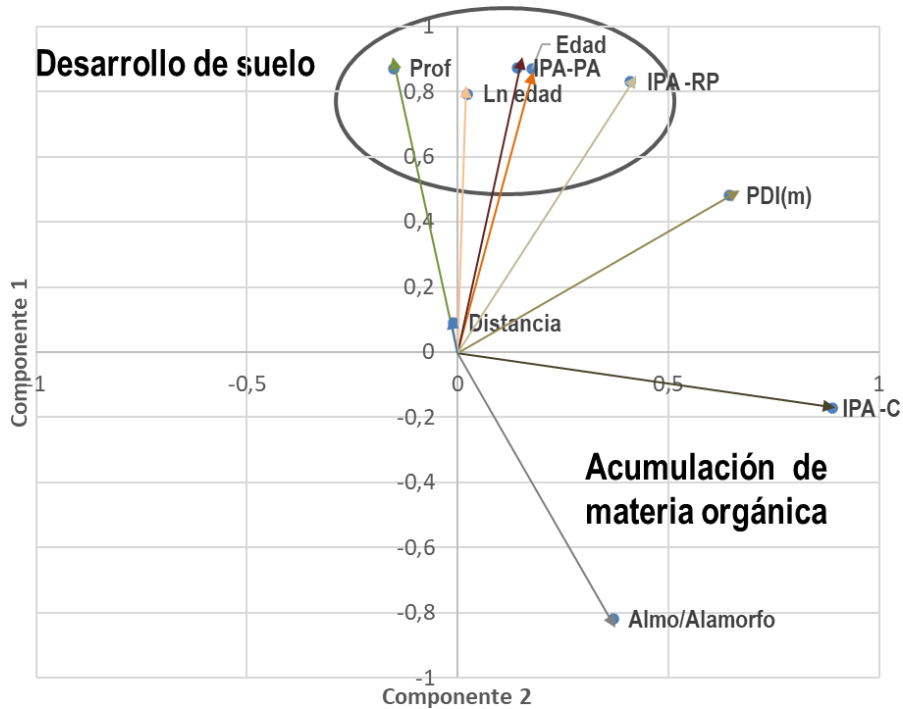


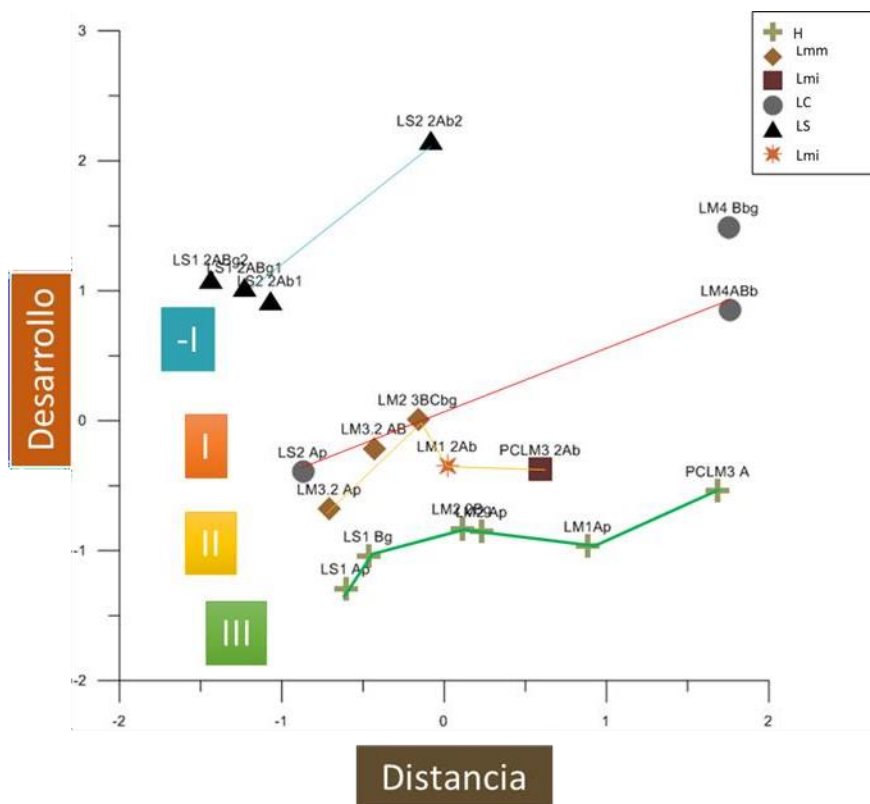
Figura 1-20: Biplot variables en componentes 1 y 2



Al comparar los primeros dos factores se puede observar que las diferencias más significativas respecto al grado de desarrollo se relacionan al tiempo de exposición (**Figura**

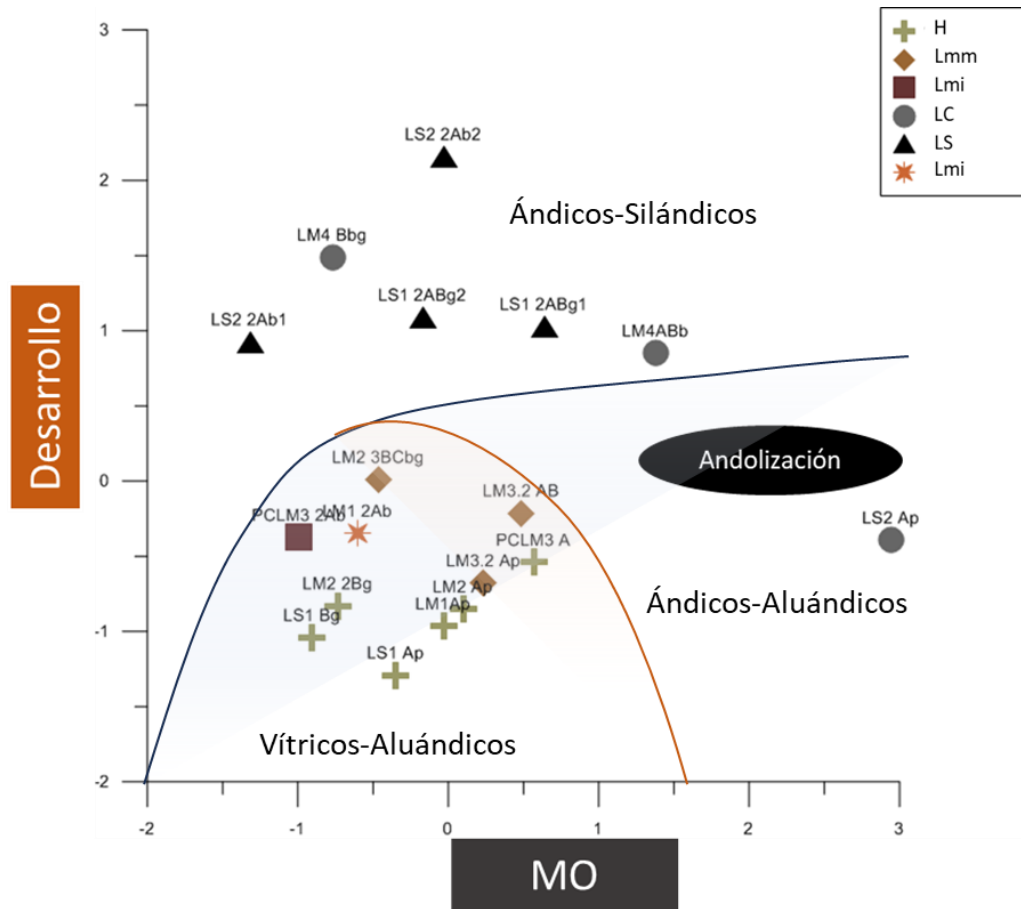
1-21), las variaciones dentro de la superficie relacionada a un mismo depósito son debidas a sepultamiento. Por otro lado, en los suelos actualmente expuestos se presenta una tendencia a aumentar el grado de desarrollo con la distancia al edificio volcánico, asociado a la disminución de la pendiente. Además, el tramo medio presenta bajo desarrollo debido a proceso de cumulización.

Figura 1-21: Relación entre los factores desarrollo de suelo y distancia al edificio volcánico.



En el caso del tercer factor, está controlado por el porcentaje de carbono orgánico en el horizonte y su carácter aluándico o silándico. La **Figura 1-22** indica el tipo y grado de andolización de los epipedones relacionados a un mismo depósito. Cabe resaltar las variaciones entre los horizontes asociados a la Formación La Cruz, en el tramo en el que están sepultados, silándicos, y en la parte alta de la cuenca donde aún están expuestos, aluándicos.

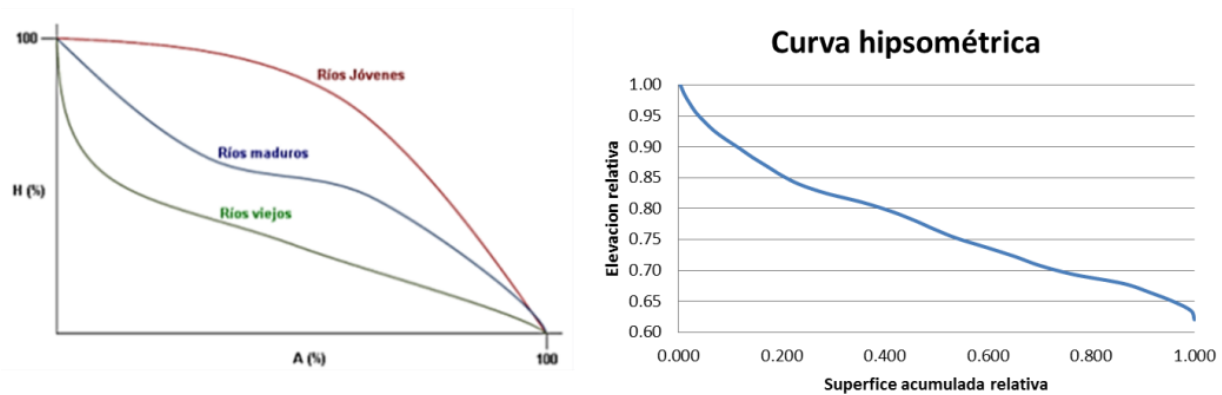
Figura 1-22: Relación entre el factor desarrollo de suelo y la capacidad de acumular materia orgánica.



La cuenca de la Quebrada Humadal es una cuenca vieja (**Figura 1-23**). Es decir, la relación entre los cambios de elevación y el área definen una situación donde los fenómenos erosivos están en equilibrio dinámico con la sedimentación. Por consiguiente, el nivel base de la topografía, tiende a permanecer constante (Strahler, 1952). Esto quiere decir que los procesos que modifican con mayor relevancia su dinámica son externos, como el tectonismo, el vulcanismo y los cambios de vegetación o uso. Estos agentes pueden afectar de forma diferencial las propiedades del suelo, independientemente de su grado de desarrollo (Phillips, 1993), por lo que es posible que a esto se relacione el carácter de la andolización. Los horizontes con desarrollo silándico además son melánicos, es decir, predominan ácidos húmicos sobre fúlvicos. En el estudio de suelos del departamento (IGAC, 2004), se observa una tendencia de los suelos melánicos a presentarse en áreas de pasturas y, de los horizontes fúlvicos, a hacerlo en zonas de bosque. Esto concuerda

con los conceptos establecidos por Takahashi & Shoji (2001) e indica un control de la cobertura en la pedogénesis.

Figura 1-23: Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Humadal



Fuente: Modificado de (Strahler, 1952)

1.8 Conclusiones

El tiempo de exposición de las superficies geomorfológicas determina el grado de desarrollo de los suelos. Sin embargo, el tiempo de exposición puede verse afectado por la actividad volcánica, tectónica y cambios de vegetación o uso, lo que imprime diversos grados de andolización. A escalas temporales cortas, y dependiendo de la posición geomorfológica, la erosión y depositación interviene de manera desfavorable en el desarrollo de horizontes.

Los suelos con mayor desarrollo se encuentran en las superficies más antiguas y expuestas en la parte alta de la cuenca, tienen propiedades ándicas bien definidas, alto contenido de materia orgánica y pueden mostrar ambos caracteres, silándico o aluándico. Los suelos con grado moderado de desarrollo están sobre lóbulos holocénicos, se clasifican como inceptisoles, poseen valores intermedios de materia orgánica y carácter aluándico.

Se observa una tendencia a aumentar el desarrollo con la distancia al edificio volcánico; sin embargo, en la parte media de la cuenca pueden verse rejuvenecidos por la acumulación de material coluvial.

El mosaico pedológico es resultado de la superposición histórica de eventos volcánicos y la variabilidad de sus propiedades responde a su evolución poligenética.

1.9 Referencias

- Anderson, P. W., 1972. More is different. *Science*, 1972(4047), pp. 393-396.
- Arnold, R., 1983. Concepts of soils and pedology. En: L. Wilding, N. Smeck & G. Hall, edits. *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. Amsterdam: Elsevier, pp. 1-21.
- Birkeland, P., 1984. Holocene soil chronofunctions, Southern Alps , New Zeland. *Geoderma*, 34(2), pp. 115-134.
- Blakemore, L., Searle, P. & Daly, B., 1981. Soil bureu laboratory methods: A method for chemical analysis of soils. *New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10a*, pp. 44-45.
- Bockheim, J., Gennadiyev, A., Hammer, R. & Tandarich, J., 2005. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*, Issue 124, pp. 23-36.
- Bray, R. & Kurtz, L., 1945. etermination of total, organic and avialiable forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, Issue 59, pp. 39-45.
- Brewer, R., Crook, A. & Speight, J., 1970. Proposal for soil-stratigraphic units in the Australian stratigraphic code. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1(17), pp. 103-111.
- Butler, B., 1982. A new system for soil studies. *Journal of Soil Science*, Issue 33, pp. 581-595.
- Butler, B. E., 1959. Periodic phenomena in landscapes as a basis for soil studies. *CSIRO Australia soil publication*, Issue 14.
- Carvajal, J., 2012. *Propuesta de estandarización de la cartografía geomofológica en Colombia*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Castañeda, I., 2013. *Paleoecología de Alta Resolución del Holoceno (11000 Años), en el Páramo de Belmira, Antioquia (Colombia)*, Medellín: s.n.

- Cline, J. & Johnson, D., 1963. Threads of genesis in the seventh approximation. *Soil Science Society of America Journal*, 27(2), pp. 220-222.
- Dan, J. & Yaalon, D., 1964. *The application of the catena concept in studies of pedogenesis in Mediterranean and desert fringe areas*. Bucharest, 8th Trans. Int. Congr. Soil Sci., pp. 751-758.
- Dokucháyev, V., 1893. *Las Estepas Rusas: Estudio de Suelos en Rusia, Pasado y Presente*. San Petersburgo, Rusia: s.n.
- FAO, 2015. *World Reference Base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fisher, R. & Schmincke, H.-U., 1984. *Pyroclastic rocks*. Verlag, Berlín: Springer.
- Fridland, V. M., 1974. Structure of the soil mantle. *Geoderma*, Volumen 12, pp. 35-45.
- Gee, G. & Bauder, J., 1986. Particle-size Analysis. En: A. Klute, ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods Agronomy Monograph 9*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy.
- Giraldo-Obando, J., 2012. *Zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en el corregimiento de Las Mesas, municipio de El Tablón de Gómez, departamento de Nariño*, San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- González-Carranza, Z., Hooghiemstra, H. & Vélez, M. I., 2012. Major altitudinal shifts in Andean vegetation on the Amazonian flank show temporarily loss of biota in the Holocene. *The Holocene*, Volumen 22, pp. 1227-1241.
- Harden, J., 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions: Examples from chronosequence in Central California. *Geoderma*, Issue 28, pp. 1-28.
- Holmgren, G., 1967. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Volumen 31, pp. 210-211.
- Honna, T., Yamamoto, S. & Matsui, K., 1988. A simple procedure to determine melanin index useful to separation of melanin and fulvic Andisols. *Pedologists*, Volumen 32, pp. 69-78.
- Hooghiemstra, H., 1984. Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Colombia : a continuous record of the last 3.5 million years. En: T. Van der Hammen, ed. *The Quaternary of Colombia*. Verlag, Vaduz : J. Cramer, p. 368.
- Huggett, R. J., 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. *Geoderma*, Issue 13, pp. 1-22.

- Huggett, R. J., 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*, Issue 32, pp. 155-172.
- Huggett, R. J., 2011. *Fundamentals of geomorphology*. Third edition ed. New York, EEUU: Routledge.
- IGAC, 2004. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Nariño*. Segunda ed. Bogotá, D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IGAC, 2006. *Métodos analíticos de laboratorio de suelos*. 6ta ed. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Jenny, H., 1958. Role of the plant factor on the pedogenic functions. *Ecology*, 39(1), pp. 5-16.
- Johnson, D., Keller, E. & Rockwell, T., 1990. Dynamic Pedogenesis: Newviews on some key soil concepts, and a model for interpreting quaternary soils. *Quaternary Research*, Issue 33, pp. 306-319.
- Kraus, M., 1999. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. *Earth-Science Reviews*, Issue 47, pp. 41-70.
- Kuhry, P., Salomons, B., Riezebos, P. & Van der Hammen, T., 1983. Paleoecología de los últimos 6000 años en el área de la Laguna del Otún-El Bosque. En: T. Van der Hammen, S. Díaz-P. & V. Álvarez, edits. *La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados. Estudios de ecosistemas tropandinos*. Primera edición ed. berlín, Stuttgart: J. Cramer, pp. 227-262.
- Lucchi, F., 2013. Chapter 5. Stratigraphic methodology for the geological mapping of volcanic areas: insights from the Aeolian archipelago (southern Italy). En: *GEological Society. London, Memoirs*. Londres: The Geological Society of London, pp. 37-53.
- Malagon-C., C. & Pulido-R., C., 2000. Suelos del páramo Colombiano. En: O. Rangel, ed. *Colombia diversidad biótica III: la región de vida paramuna de Colombia*. s.l.:Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional. Instituto Alexander von Humboldt. .
- MAVDT, 2007. *Resolución 0485 de 2007*. s.l.:s.n.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018. *Resolución No. 0342 del 7 de Marzo de 2018*. s.l.:s.n.
- Monger, H. & Bestelmeyer, B., 2006. The soil-geomorphic template and biotic change in arid and semi-arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, Issue 65, pp. 207-218.
- Monger, H. & Rachal, D., 2013. Soil and landscape memory of climate change - How sensitive, how connected?. *SEPM Special Publication*, Issue 104, pp. 63-69.

- Naranjo Heano, J. L., Pulgarín Alzate, B. A. & Narvárez Marulanda, B. L., 2009. *ESTRATIGRAFÍA DE LOS DEPÓSITOS VOLCÁNICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAYO, DEPARTAMENTO DE NARIÑO*. s.l., s.n.
- Navarro, S. y otros, 2009. Geología e historia eruptiva del Complejo Volcánico Doña Juana (CVDJ), Nariño. *Boletín de Geología*, 31(2), pp. 109-118.
- North American Commission on Stratigraphic Nomenclature, 2005. North American Stratigraphic Code. *AAPG Bulletin*, 89(11), pp. 1547-1591.
- Pantoja, A., 2016. *Evaluación de los servicios ecosistémicos en el complejo Páramo Doña Juana - Chicamoy*, s.l.: s.n.
- Pardo, N., Pulgarín, B. & Betancourt, V., 2016. *Avances en el conocimiento sobre el complejo volcánico Doña Juana: Integración del análisis de litofacies, estratigrafía, geocronología y petrología*, Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Pardo, N. y otros, 2018. Facing geological mapping at low-latitude volcanoes: The Doña Juana Volcanic Complex study-case, SW-Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Parques Nacionales Naturales, 2017. *Lineamientos institucionales para afrontar el clima cambiante desde áreas protegidas*. Bogotá D.C.: s.n.
- Phillips, J., 1993. Progressive and regressive pedogenesis and complex soil evolution. *Quaternary Research*, Issue 40, pp. 169-176.
- Phillips, J. D., 1998. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation (with Discussion). *Geoderma*, Volumen 86, pp. 1-21.
- Phillips, J. D., 1999. *Earth surface systems - Complexity, order and scale*. Oxford: Blackwell.
- Pulgarín, B. y otros, 2008. *Geología e Historia eruptiva del Complejo Volcánico Doña Juana-Colombia*, Manizales-Popayán, Colombia: INGEOMINAS.
- Salazar, S. y otros, 2022. Geomorphology in a tropical volcanic setting: interplay of fluvial gravitational, structural, and volcanic processes in the Doña Juana Volcanic Complex, Colombia. *Journar of maps*, Volumen Sometido.
- Salomons, J., 1989. Paleoecología de suelos volcánicos de la Cordillera Central colombiana (Parque Nacional Natural de los Nevados). En: T. van der Hammen, S. Díaz-P. & V. Alvarez, edits. *La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque los Nevados. Estudios de ecosistemas tropandinos*. Berlín, Stuttgart: J. Cramer, pp. 3:15-217.

- Sánchez Espinosa, J. A. & Rubiano Sanabria, Y., 2015. Procesos Específicos De Formación En Andisoles, Alfisoles Y Ultisoles En Colombia. *Revista EIA*, 12(571), pp. 85-97.
- SGC, 2014. *Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100000 Plancha 411 - La Cruz*, Bogotá D. C.: SGC.
- SGC, 2015. *Memoria explicativa, Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100000 Plancha 411- La Cruz*, Bogotá D. C.: SGC.
- Shoji, S., Nanzyo, M. & Dahlgren, R., 1993. *Volcanic Ash Soils — Genesis, Properties and Utilization*. Amsterdam: Elsevier.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. A. & Quantin, P., 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources.. *Soil Science*, Volumen 161, pp. 604-615.
- Shoji, S. & Takahashi, T., 2002. Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, Volumen 6, pp. 113-135.
- Simonsons, R. & Gardner, D., 1960. *Concepts and function of the pedon*. Madison, WI, 7th Internat. Congress. of Soil Sci., pp. 127-131.
- Simonsons, W., 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America Journal*, 23(2), pp. 152-156.
- Smith, B., 1994. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical determinative methods. *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*, pp. 333-357.
- Smith, G., 1986. *The Guy Smith interviews: Rationale for concepts in soil taxonomy*, s.l.: s.n.
- Soil Science Division Staff, 2017. *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook N°18 ed. s.l.:USDA.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd ed. U.S.: Natural Resources Conservation Service. Department of Agriculture Handbook 436.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to soil taxononomy*. s.l.:USDA.
- Solarte-Cruz, M. E. y otros, 2007. Proyecto Estado Del Arte De La Información Biofísica Y Socioeconómica De Los Páramos De Nariño. p. 143.
- Steimle, U., 1989. *The Doña Juana volcano. Departamento de Nariño, suthern Colombia*, s.l.: Eberhard Karls University.

- Strahler, A., 1952. Hypsometric (Area-Altitud) analysis of erosional topography. *Bulletin of the geological Society of America*, Volumen 63, pp. 1117-1142.
- Takahashi, T. & Shoji, S., 2001. Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, Volumen 6, pp. 83-97.
- Thouret, J., Van der Hammen, T., Salomons, B. & Juvigné, E., 1996. Paleoenvironmental changes and glacial stades of the last 50.000 years in the Cordillera Central, Colombia. En: T. Van der Hammen, S. Díaz-P & V. Álvarez, edits. *La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados. Estudios de ecosistemas tropandinos*. Berlín, Stuttgart: J. Cramer, p. 4:.
- Tricart, J., 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Primera ed. Paris, Francia: Masson et cis.
- Tricart, J., 1972. *La terre, planète vivante*. Paris, Francia: Presses Universitaires de France.
- Tricart, J. & Kilian, J., 1979. *L'écogéographie et l'aménagement du milieu naturel*. Primera ed. Paris, Francia: Hérodote.
- Tsai, C. y otros, 2010. Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma*, Issue 156, p. 48–59.
- Tsai, H., Zeng-Yei, H., Wen-Shu, H. & Zueng-Sang, C., 2007. Pedogenic approach to resolving the geomorphic evolution of the Pakua river terraces in central Taiwan. *Geomorphology*, Issue 83, pp. 14-28.
- UAESPNN, 2008. Plan de manejo Parque Nacional Natural Complejo Volcánico Doña Juana Cascabel 2008-2013. p. 189.
- Universidad de Nariño - IIRB Alexander von Humboldt, 2015. *ESTUDIOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES COMPLEJO DE PÁRAMOS DOÑA JUANA – CHIMAYOY*, San Juan de PAsto: s.n.
- Universidad de Nariño; IAvH, 2015. Entorno regional del Complejo de páramos Doña Junana-Chimayoy. En: *Estudio técnico, económico, social y ambiental para la identificación y delimitación a escala 1:100000 del Complejo de Páramos Doña juana -Chimayoy*. San Juan de Pasto, Nariño: s.n., p. 531.
- Van der Hammen, T., Barelds, J., de Jong, H. & de Veer, A. A., 1980/1981. Glacial sequence and environmental history in the Sierra Nevada del Cocuy, Colombia.. *Paleogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, Issue 32, pp. 247-340.

- Van Geel, B. & Van der Hammen, T., 1973. Upper Quaternary vegetational and climatic sequence of the Fúquene area (Eastern Cordillera, Colombia). *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleocology*, Volumen 14, pp. 9-92.
- Velásquez, C., 2004. *Paleoecología de alta resolución de Holoceno tardío en el páramo de Frontino–Antioquia*, Bogotá: s.n.
- Velásquez, R. E., 2013. *Paleoecología de alta resolución del final de la última glaciación y transición al Holoceno en el Páramo de Belmira (Antioquia)*, Medellín: s.n.
- Villota, S., 2019. *Geomorfología y morfogénesis del flanco occidental del Complejo Volcánico Doña Juana, Nariño, Colombia*, s.l.: Universidad Nacional de Colombia.
- Walker, P. & Green, P., 1976. Soil trends in two valley fill sequences. *Australian Journal of Soil Research*, Issue 14, pp. 291-303.
- Walkley, A. & Black, A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Issue 37, pp. 29-37.
- Yaalon, D., 1983. Climate, time and soil development.. En: L. Wilding, N. Smeck & G. Hall, edits. *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and Interactions*. Amsterdam: Elsevier, pp. 223-251.
- Yaalon, D. H., 1971. Soil forming processes in time and space. En: D. H. Yaalon, ed. *Paleopedology: Origin, Nature and Dating of Paleosols*. Jerusalem, Israel: Int. Soc. Soil Sci., Israel Univ., pp. 29-39.
- Yaalon, D. H., 1975. Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be solved?. *Geoderma*, Issue 14, pp. 189-205.
- Zinck, J., 2016. *Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. 1 ed. New York: Springer.

2. Capítulo 2: Morfodinámica del Volcán Doña Juana mediante análisis de sensibilidad del paisaje

2.1 Resumen

El Complejo Volcánico Doña Juana, Nariño, se encuentra en el cinturón volcánico de los Andes, el cual se caracteriza por su alto dinamismo. La combinación de factores ambientales, volcánicos y tectónicos, hacen de esta zona un lugar susceptible a procesos morfodinámicos de gran magnitud. Si bien se han adelantado estudios de amenaza en la región, estos parten de una caracterización estática del territorio. Es decir, no logran expresar los diversos cambios (y procesos) del paisaje después de una perturbación. En esta investigación se propone una metodología que mide la magnitud del cambio, espacial y temporal, de las geformas, o el suelo, frente a un proceso gravitacional. Se utiliza el concepto de sensibilidad del paisaje como complemento a la noción de amenaza. Para tal fin, se estudió la cuenca de la Quebrada Humadal, como área piloto, donde se establecieron dos índices empíricos, uno morfodinámico y otro de desarrollo de suelo. El índice morfodinámico (valores entre -3 y +3), calculado en ArcGIS, se estima para identificar si predomina la erosión (valores negativos) o la depositación (valores positivos). Para el índice de desarrollo de suelo se construyó una función que incluye el índice morfodinámico y parámetros como pendiente, distancia al edificio volcánico, y ocurrencia de procesos gravitacionales/volcánicos/tectónicos. Este último índice mide la tasa de formación de suelo en centímetros por año. El desarrollo de suelo se analizó en un modelo de retroalimentación dinámica utilizando el software Vensim®, lo que permitió visualizar si los procesos erosivos/depositacionales se autorregulan. Asimismo, se realiza un *Análisis de Sensibilidad a condiciones iniciales* mediante los exponentes de Lyapunov para describir el comportamiento de los efectos de una perturbación. Con esta metodología

pudo concluirse que la morfología de los tipos de perfiles de suelos en la parte alta, media y baja de la cuenca de la Quebrada Humadal tienden a ser combinados, compuestos y cumulativos dependiendo de la relación sedimentación/depositación/pedogénesis. En la parte alta de la cuenca domina la erosión laminar. Esto significa la formación de suelos con bajo grado de desarrollo y poco espesor en perfiles combinados. En la parte media influyen más los procesos gravitacionales. Los suelos tienen un moderado grado de desarrollo y espesor en perfiles combinados truncados. En la parte baja, los depósitos de procesos volcánicos permiten la formación de suelos desarrollados, profundos, en perfiles cumúlicos-combinados. De esta manera, se explican las relaciones dinámicas suelo-paisaje frente a escenarios de cambio para crear una línea base para el monitoreo de movimientos en masa.

Palabras clave dinámica de sistemas, suelo-paisaje, simulación

2.2 Abstract

The Doña Juana Volcanic Complex, Nariño, is located in the Andes volcanic belt, which is characterized by its high dynamism. The combination of environmental, volcanic and tectonic factors make this area a place susceptible to large-scale morphodynamic processes. Although geohazard studies have been carried out in the region, these studies are based on a static approach. That is, they fail to express the various changes (and processes) of the landscape after a disturbance. This research proposes a methodology that measures the magnitude of the change, spatial and temporal, of the geoforms, or the soil, in the face of a gravitational process. The concept of landscape sensitivity is used as complementary to the notion of hazard. The Humadal Creek basin was studied for this purpose as a pilot area, where two empirical indices were established: a morphodynamic index and a soil development index. The morphodynamic index (values between -3 and +3) was calculated using ArcGIS. This index estimates whether erosion (negative values) or deposition (positive values) predominates. For the soil development index, a function was built that includes the morphodynamic index and parameters such as slope, distance to the volcanic edifice, and occurrence of gravitational/volcanic/tectonic processes. The soil

development index measures the rate of soil formation in centimeters per year. With the two indices, a dynamic feedback model was created using the Vensim® software. The dynamic model made it possible to visualize whether the erosive/depositional processes are self-regulating. Likewise, a *Sensitivity to initial conditions Analysis* with Lyapunov exponents was used to describe the behavior of the response to these perturbations. With this methodology it was concluded that the morphology of the soils in the upper, middle, and lower part of the Humadal Creek basin corresponds to different degrees of maturity. Similarly, several profile types such as combined, composite and cumulative profiles developed, depending on the sedimentation/deposition/pedogenesis rates. In the upper part of the basin, sheet erosion dominates. This means a soil formation with low degree of maturity and little thickness. They form combined profiles. In the middle part, the gravitational processes are more significant. The soils have a moderate degree of maturity and thickness. These soils correspond to combined truncated profiles. In the lower part, the deposits of volcanic processes allow the formation of mature, deep soils, in cumulative-combined profiles. In this way, with the method proposed here, it is possible to explain soil-landscape dynamics in changing scenarios to further serve as a baseline for monitoring mass movements.

Keywords: system dynamics, soil-landscape, simulation

2.3 Introducción

Estudios previos han identificado en la Quebrada Humadal una alta amenaza por fenómenos de remoción en masa (Giraldo-Obando, 2012; SGC, 2014), volcanismo y sismicidad (IDEAM, 1999). A escala regional se han determinado índices semi-cuantitativos sobre la morfodinámica del paisaje (IDEAM, 1999; SGC, 2014). De acuerdo con estos índices, se muestra que la alta montaña y el área de influencia del Parque Nacional Natural Doña Juana es susceptible a procesos morfodinámicos debido a su paisaje glacial heredado; mientras que, en la montaña media, dominan los procesos de disección y los movimientos en masa (IDEAM, 1999). También se han reconocido en el área de estudio evidencias de flujos de escombros provenientes del cerro Montoso (Pardo, et al., 2018) donde se han descrito rasgos geomorfológicos de deslizamientos recientes (SGC, 2015). Se trata de una zona inestable y en constante cambio, por consiguiente, entender cómo responde el paisaje a sus agentes modificadores es una herramienta para la planificación de las actividades que se desarrollen en el valle de la Quebrada Humadal y la población aledaña de Las Mesas (Giraldo-Obando, 2012).

En los estudios de gestión de riesgo se ha estudiado al paisaje bajo una mirada antropocéntrica y estática (Brunsden & Thornes, 1979). Si bien es necesaria, esta postura reduccionista, aísla los componentes del paisaje y su comportamiento. Es por esto por lo que el presente trabajo busca analizar la sensibilidad como una propiedad de los sistemas geomorfopedológicos dinámicos (Butler, 1959; Kraus, 1999), mediante los exponentes de Lyapunov.

En general, los sistemas geomorfopedológicos (Thomas, 2001), desde la aproximación proceso-respuesta (Huggett, 2011), pueden ser entendidos como inestables o estables

dependiendo de si su respuesta al cambio es caótica o si presentan resistencia dentro de un umbral **Figura 2-1**. La sensibilidad, en dinámica de sistemas, indica la magnitud de la respuesta de un sistema a una perturbación (Phillips, 1999) y es directamente proporcional a la relación entre la tasa de cambio del sistema sobre la tasa de cambio de un componente (Brunsdén & Thornes, 1979; Phillips, 1999; Thomas, 2001)

Figura 2-1: Comportamientos básicos de los sistemas proceso-respuesta.



Fuente: Tomado y modificado de (Huggett, 1998)

El equilibrio de una superficie geomorfológica se altera por los cambios en el entorno. Existen tres procesos principales que generan cambios: la erosión, la sedimentación y la pedogénesis (Butler, 1959; Tricart, 1965; Huggett, 1975; Kraus, 1999; Thomas, 2001). La superposición de estos procesos regula los flujos de materia y energía entre las superficies geomorfológicas, lo cual restringe la dirección en la que evoluciona el paisaje en función de su propia historia y sensibilidad (Brierley, 2010).

Por ello, entender qué tan sensibles son ciertos componentes del paisaje, a procesos como la erosión y la depositación, ayuda a prever situaciones de riesgo y plantear escenarios a futuro. El enfoque sistémico puede orientar la cartografía para el ordenamiento territorial

(Rossignol, 1987; Mendoza, et al., 2009; Aguilar, et al., 2018) de modo que constituya parte de los instrumentos que permiten la formulación de políticas sobre el uso adecuado de la tierra (FAO, 1981) y la gestión del riesgo.

2.3.1 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es un enfoque que permite entender al objeto de estudio como una unidad de elementos que interactúan y cuyas propiedades cambian con el tiempo, es decir las variables asociadas a cada elemento tienen una trayectoria y la suma de esas trayectorias define al sistema (Aracil, 1995). Se ha convertido en una herramienta para modelar sistemas complejos como es el relieve, e.g. Huggett, (2011), Phillips (2016). Consiste en identificar ciclos de retroalimentación entre los elementos del sistema geomórfico.

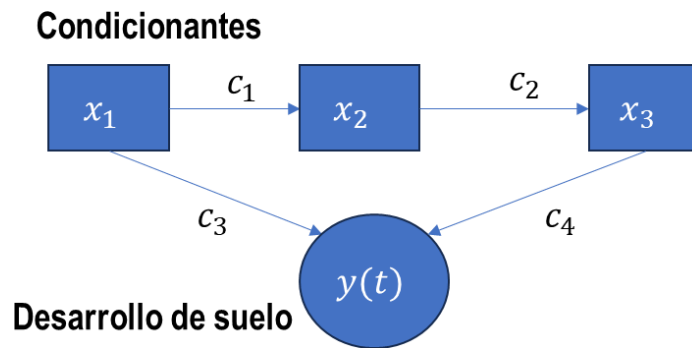
2.3.2 Sensibilidad a condiciones iniciales

La sensibilidad de un sistema, específicamente a las condiciones iniciales, permite entender su comportamiento en varios escenarios. Esta propiedad concibe al paisaje de manera dinámica, interconectada y, dentro de un ejercicio de pronóstico, permite establecer intervalos de confianza en términos del tiempo válido para una proyección. Por esto establecer la sensibilidad del sistema es una evaluación complementaria a la amenaza.

Los sistemas dinámicos pueden definirse como un conjunto de interacciones entre componentes reguladas por funciones (**Figura 2-2**) de manera que:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)(c_1, c_2, c_3, \dots, c_m) \quad i = (1, n) \quad (1)$$

Figura 2-2: Esquema relación de condicionantes, interacciones y respuesta del modelo dinámico



Donde los elementos x_i son los componentes condicionantes (e.g., pendiente, distancia al edificio volcánico, andolización, etc.) y c_i sus interacciones (e.g., erosión, sedimentación y pedogénesis).

Suponiendo una perturbación pequeña δx_i , es decir, que no altere las interacciones del sistema (c_i), su propagación con el tiempo puede explicarse en términos de la matriz jacobiana. En otras palabras, en el conjunto de derivadas parciales de la función respecto de las variables de entrada (Phillips, 1999):

$$\frac{d\delta x_i}{dt} = a_{ij} \delta x_i \quad (2)$$

$$a_{ij} = \partial f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) / \partial x_j \Big|_0^n \quad (3)$$

Donde a_{ij} es un elemento de la matriz jacobiana.

El sistema dinámico también puede definirse en términos de su ecuación de transferencia $G(s)$ como se muestra en la Ecuación 4, pasando del dominio del tiempo (t) a (s), la frecuencia:

El diagrama muestra un sistema dinámico en el dominio de la frecuencia. Una flecha de entrada etiquetada $x(t)$ entra en un cuadro rectangular etiquetado $g(t)$. Una flecha de salida etiquetada $y(t)$ sale del cuadro. A la derecha de este diagrama se presenta la ecuación (4):

$$G(s) = \mathcal{L}\{g(t)\} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m)}{(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n)} \quad (4)$$

En donde $X(s)$ y $Y(s)$ son las transformadas de Laplace de las entradas y salidas del sistema, respectivamente (Ecuaciones 5 y 6).

$$Y(s) = \mathcal{L}\{y(t)\} = \int_{0^-}^{\infty} y(t)e^{-st}dt \quad (5)$$

$$X(s) = \mathcal{L}\{x(t)\} = \int_{0^-}^{\infty} x(t)e^{-st}dt \quad (6)$$

Y, de donde, el término en el denominador de la Ecuación 4 es la ecuación característica de la matriz jacobiana A (Phillips, 2021):

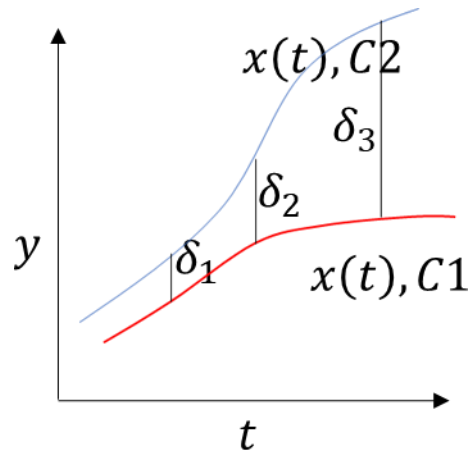
$$(a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n) = 0 \quad (7)$$

Y, dado que la transformada de Laplace inversa es:

$$\mathcal{L}^{-1}\{X(s)\} = x(t) = c_1e^{-\lambda_1t} + \dots + c_n e^{-\lambda nt} = vCe^{\lambda t} \quad (8)$$

Donde v es la matriz de autovectores, C la matriz de condiciones iniciales, puede entenderse la tasa de divergencia o convergencia del sistema como la diferencia de la trayectoria con unas condiciones iniciales $C1$ y unas condiciones iniciales diferentes $C2$ (Cencini, et al., 2010)(**Figura 2-3**):

Figura 2-3: Diferencia de dos trayectorias seguidas por el sistema dinámico



$$\delta(t) \sim \Delta\delta_0 e^{\lambda t} \quad (9)$$

Los exponentes de Lyapunov se definen como los coeficientes de los autovalores de la matriz jacobiana y explican la divergencia o convergencia del sistema (Phillips, 1999). Según criterio de Routh-Hurwitz, que analiza la estabilidad de un sistema, este es caótico si estos exponentes son mayores a 1, es decir, la divergencia causada por una perturbación crece exponencialmente con el tiempo. Si los exponentes son menores a 0 el sistema es estable y, si algún exponente es 0, es neutralmente estable.

Entonces, mediante un análisis de la divergencia de una simulación en escenarios con condiciones iniciales extremas es posible evaluar la sensibilidad del modelo dinámico a las perturbaciones en cada variable. El resultado esperado para el caso del suelo-paisaje es comprender qué perturbaciones tienen mayor efecto en el equilibrio erosión/depositación/pedogénesis.

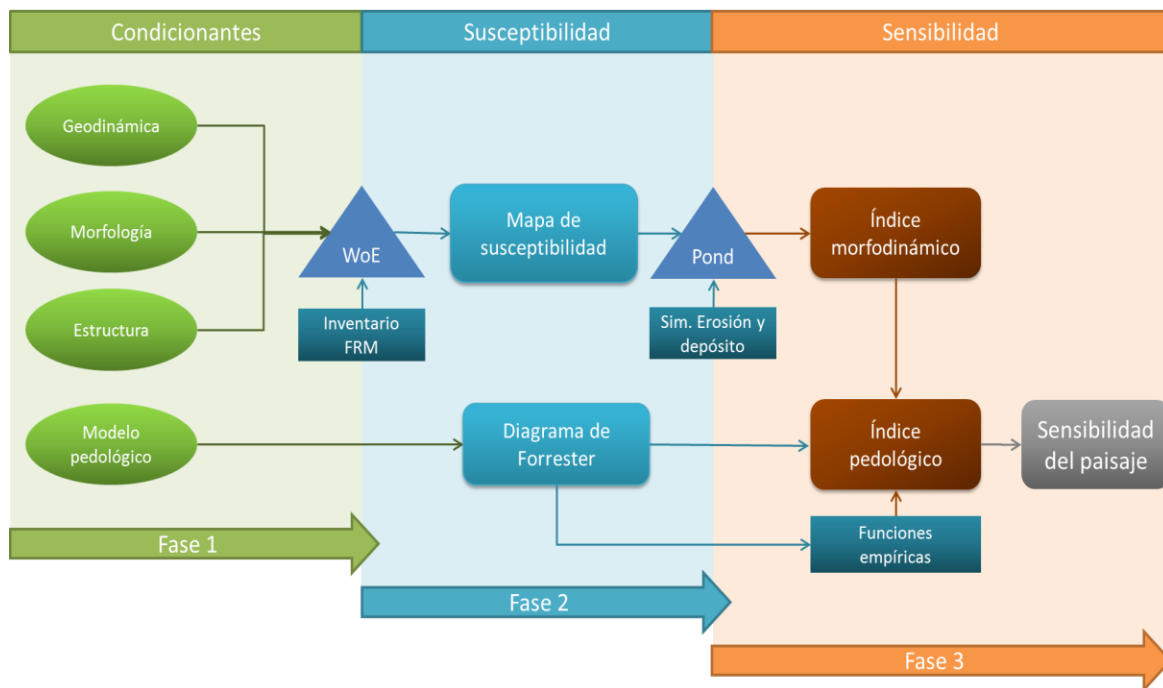
2.4 Métodos

2.4.1 Evaluación de la sensibilidad

Brunsen (2001) describe la sensibilidad del paisaje como la capacidad de las geoformas a cambiar, según como actúen las fuerzas de resistencia y transformación. Para evaluarla propone entender las especificaciones del sistema, tener valores de probabilidad, direccionalidad del estrés y la resistencia al cambio de las variables. De otro lado, el Servicio Geológico Colombiano, implementó un método de zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa (FRM) (SGC, 2017), utilizando los términos factores condicionantes y detonantes (2007b), semejantes a las fuerzas de resistencia y transformación de Brunsen, respectivamente, y en el que la valoración estadística es mediante el análisis de Pesos por Evidencia, llamado susceptibilidad. Esto resulta en una aproximación estática del comportamiento del sistema; sin embargo, la direccionalidad del estrés, *i.e.* la relación erosión/sedimentación no es evaluada en escalas semi-detalladas. En contraste, el método propuesto consiste en una evaluación de la sensibilidad a erosión/sedimentación/pedogénesis mediante un modelo de simulación dinámica en *Vensim PLE* que permite evaluar escenarios dentro del sistema acoplado suelo-paisaje. El esquema general de cómo se evalúa la sensibilidad puede verse en el diagrama de flujo (**Figura 2-4**). De acuerdo con la (**Figura 2-4**), se toman los factores condicionantes, se

valora estadísticamente la ocurrencia de FRM para determinar la susceptibilidad, esta información se pondera con una simulación de erosión/sedimentación con lo que se construyen dos parámetros, el índice morfodinámico (ver sección 2.4.2) y el índice de desarrollo de suelo (o pedológico; ver sección 2.4.3).

Figura 2-4: Método para la evaluación de la sensibilidad del paisaje. WoE: Pesos por evidencia, Pond: Suma ponderada, FRM: Fenómenos de Remoción en Masa.



Fuente: Modificado de (SGC, 2017)

Se utilizaron como insumo, provistos por sus respectivos autores, la cartografía geológica semidetallada de Pardo, *et al.* (2016), las unidades geomorfológicas definidas por Salazar, *et al.* (2022) y un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 4.7cm de resolución, elaborado a partir de la restitución fotogramétrica de un levantamiento con vehículo no tripulado (Salazar, *et al.*, 2022). A continuación, se explican cómo se hallaron los componentes de la **Figura 2-4**, para evaluar la sensibilidad.

2.4.2 Índice morfodinámico (GI)

El índice morfodinámico propuesto describe el grado de afectación de la erosión o la sedimentación sobre una superficie y es característico para cada unidad geomorfológica y tramo de la cuenca (consultar las unidades geomorfológicas en Salazar et al. (2022)). Su cálculo involucra la evaluación de susceptibilidad de los factores condicionantes (Fase 1, **Figura 2-4**) a Fenómenos de Remoción en Masa (FRM) y la evolución de la topografía durante 10 años de erosión, lo cual, refleja la tendencia de una geoforma a transformarse en el tiempo.

El cálculo del índice morfodinámico se realiza mediante la diferencia en altura (Δh) entre el DEM generado por fotogrametría (Salazar, et al., 2022), y un DEM de procesos erosivos construido con una simulación utilizando el software CAESAR-Lisflood. El cálculo de GI se muestra en la ecuación 10, GI es igual al logaritmo de Δh multiplicado por la susceptibilidad a FRM normalizada ($NSus_{FRM}$). La susceptibilidad normalizada es un ajuste en porcentaje de su valor máximo. Luego se ajusta el signo de GI dependiendo de si predomina la depositación ($\Delta h \geq 0$) o la erosión ($\Delta h < 0$) (**Figura 2-14**).

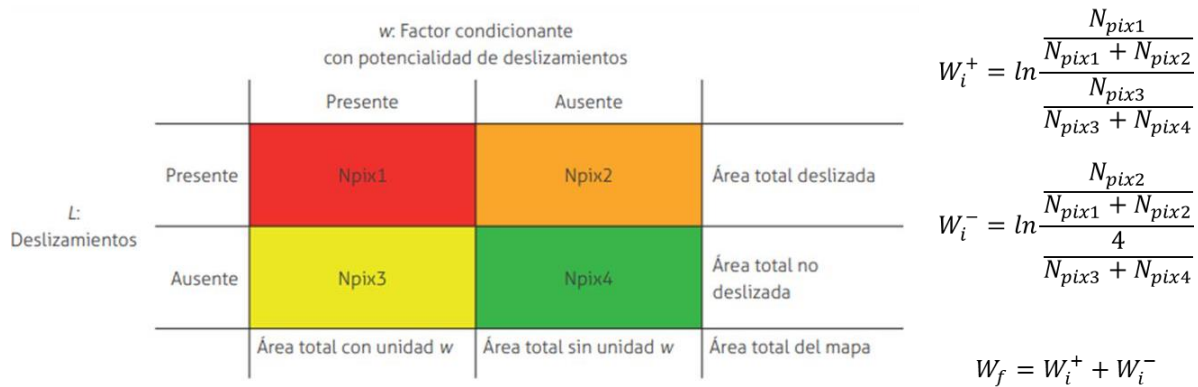
$$GI = \begin{cases} (\ln|\Delta h| * NSus_{FRM}) * -1, & \Delta h < 0 \\ (\ln|\Delta h| * NSus_{FRM}) * 1, & \Delta h \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

▪ Susceptibilidad

La susceptibilidad se estimó mediante álgebra de mapas en ArcGIS utilizando el Peso por Evidencia (Weights of Evidence, WoE) (Aristizábal, et al., 2019) cómo se muestra en la figura **Figura 2-6**. La susceptibilidad de una geoforma implica ser propenso a determinado proceso morfodinámico (e.g. erosión/depositación). En otras palabras, el grado de predisposición de la unidad geomorfológica a los procesos gravitacionales. El peso por evidencia consiste en describir la ocurrencia de FRM en un polígono y compararlo con el número de píxeles donde no ocurre el fenómeno. Es una medición estadística relativa para cada factor condicionante. Los factores condicionantes (e.g. pendiente, geología, geomorfología) son las variables más determinantes en la generación de FRM para la zona de estudio (Tabla 2-1; modificado de (SGC, 2016; Aristizábal, et al., 2019; Cardona & Serna, 2019) A mayor número de píxeles en un polígono, mayor propensión a que ocurran movimientos en masa (Lopez-Lopez, 2016; Weldu, et al., 2018; Weldu & Edo, 2020). Para este caso se utilizaron la pendiente, las unidades geológicas y geomorfológicas, y la

distancia a drenajes (**Tabla 2-1, Figura 2-5**). Cada factor ponderado de acuerdo con el peso W_i se suma para determinar la susceptibilidad en tres rangos: alta, media y baja (como se muestra en la **Figura 2-6**).

Figura 2-5: Cálculo del peso por evidencia (W) para cada categoría de los factores condicionantes. W_f es peso de ponderación; W_i^+ es el peso positivo i que tiene el condicionante (es decir cuanto pesa cuando está presente); W_i^- es el peso negativo i que tiene el condicionante (es decir cuanto pesa cuando está ausente).

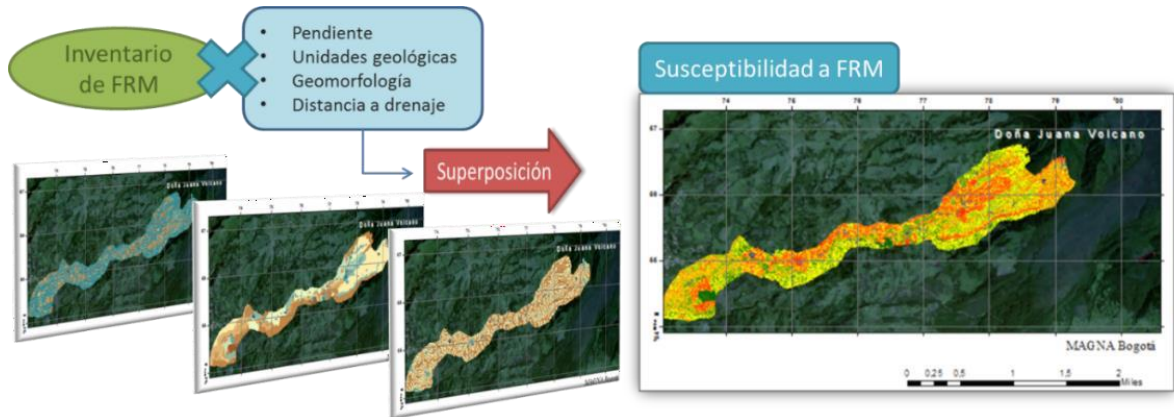


Fuente: Tomado y modificado de SGC (2017)

Tabla 2-1: Variables evaluadas en la determinación de susceptibilidad a FRM de factores condicionantes

Condicionante	Variable
Geodinámica	Inventario de FRM
Morfología	Unidades geomorfológicas detalladas Pendiente Distancia a drenaje
Estructura	Unidades geológicas

Fuente: Tomado y modificado de SGC (2017)

Figura 2-6: Esquema general de estimación de susceptibilidad a FRM

▪ Simulación de erosión

Para simular 10 años de erosión se utilizó el software CAESAR-Lisflood, que combina el modelo de flujo hidrodinámico Lisflood-FP 2D, basado en las ecuaciones de agua somera simplificadas a dos dimensiones, y el modelo de evolución del paisaje CAESAR de Coulthard, et al. (2002) y Van De Wiel, *et al.* (2006). El programa se compone de tres módulos. El primero, distribuye los datos de precipitación sobre la topografía. El segundo usa Lisflood para estimar la profundidad y velocidad del agua en cada celda. El tercero calcula un esfuerzo de cizalla que permite estimar la erosión o depositación (Einstein, (1950) o Wilcock y Crowe, (2003). Se utilizan como insumos el DEM de la cuenca de 4.7cm de resolución (Salazar, et al., 2022), remuestreado a 5m, y ajustado para remover obstáculos del drenaje principal. También se utilizaron los datos meteorológicos de precipitación por hora obtenidos de una estimación para los datos de precipitación diaria en los años 2018, 2019 y 2020 de la estación automática APONTE [52040050] (Lat: 1.397333333, Lon: -77.03052778, IDEAM). El resultado es un DEM que simula la erosión.

2.4.3 Diagrama de Forrester: relaciones causales entre procesos pedogenéticos y grado de desarrollo del suelo

A partir de la pedogénesis de la Quebrada Humadal (Capítulo 1) se identificaron las relaciones causales entre procesos pedogenéticos y grado de desarrollo del perfil. Estas relaciones dan forma a un esquema inicial (modelo conceptual) del modelo dinámico (diagrama de Forrester), donde se establecen funciones empíricas para entender las

interacciones de los procesos pedogenéticos y el grado de desarrollo (e.g. a mayor andolización mayor grado de desarrollo). Estas funciones, explican la dinámica de la tasa de formación de suelo de acuerdo con los espesores y desarrollo de los perfiles analizados. De forma descriptiva se puede observar en la **Figura 2-7** que, a mayor profundidad del suelo, mayor grado de desarrollo. Asimismo, A mayor distancia al edificio volcánico, menor pendiente. A esto se le denominan ciclos de retroalimentación.

El diagrama de Forrester permite identificar los ciclos de retroalimentación, que son interacciones que autorregulan o magnifican el efecto de un cambio. Por ejemplo, la retroalimentación negativa entre pendiente y los FRM: a menor pendiente, menor ocurrencia de FRM y, a mayor ocurrencia de FRM, menor pendiente (se autorregula).

Figura 2-7: Diagrama de Forrester del sistema suelo-paisaje para la Quebrada Humadal, el signo indica la relación con otros factores inversa (negativo) o directa (positivo).

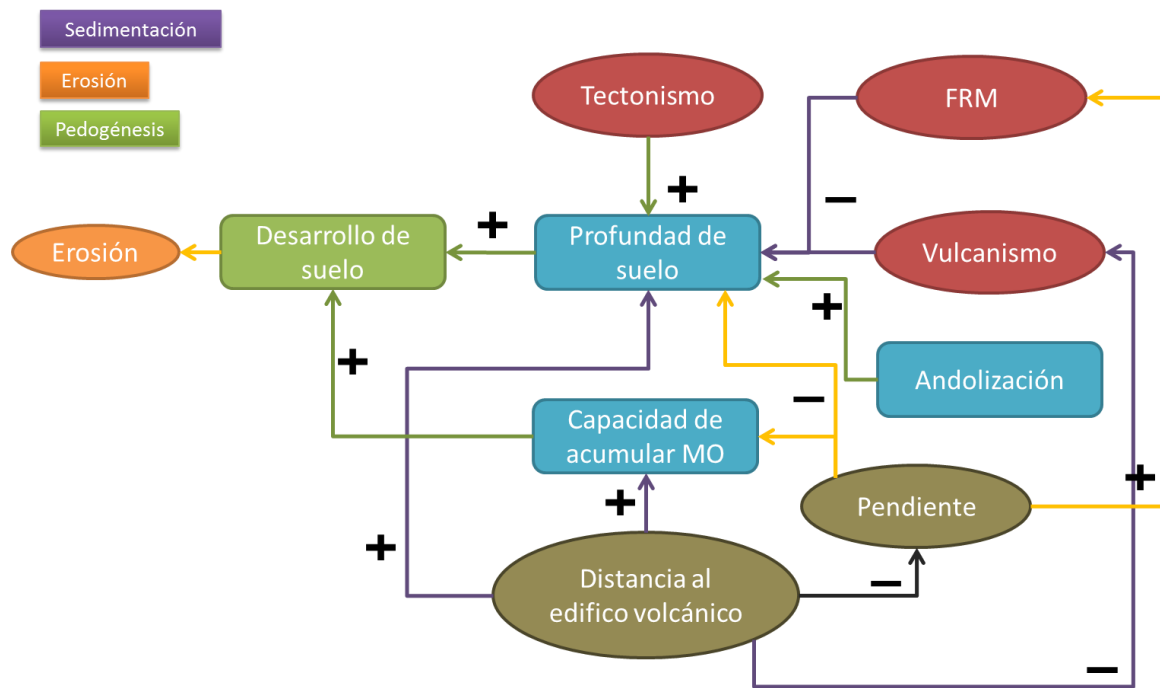
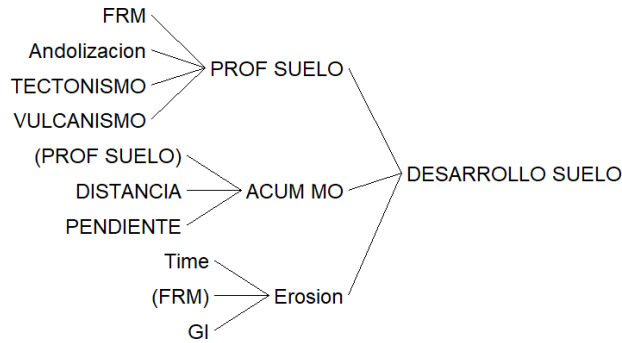


Figura 2-8: Relaciones causales de la variable de nivel “Desarrollo de Suelo”. Variables causales (FRM, andolización, etc.) que explican el desarrollo de suelo.



La **Figura 2-8** es, en síntesis, el esquema previo que muestra la dependencia (coherencia) de las variables y que será utilizado en el modelo dinámico. Define las variables de nivel que se van a utilizar en el sistema dinámico.

2.4.4 Índice de desarrollo de suelo (pedológico)

El índice de desarrollo de suelo intenta representar el grado y cantidad de suelo formado en un punto específico de la cuenca de la Quebrada Humadal a lo largo de 1500 años, tiempo arbitrario definido para la simulación. Durante este tiempo pueden ocurrir FRM y fenómenos eruptivos, que cubran o erosionen el perfil. El desarrollo de suelo es entonces el material que se añade y transforma en el perfil de suelo menos la erosión (Ecuación 11) (**Figura 2-9**). La Ecuación 11, se construyó con base en el diagrama de Forrester que muestra cuales condicionantes (**Figura 2-7**) determinan erosión/depositación/pedogénesis.

$$Desarrollo_{suelo(i)} = [(ACUM_{mo} + PROF_{suelo}) - Erosion] - Desarrollo_{suelo(i-1)} \quad (11)$$

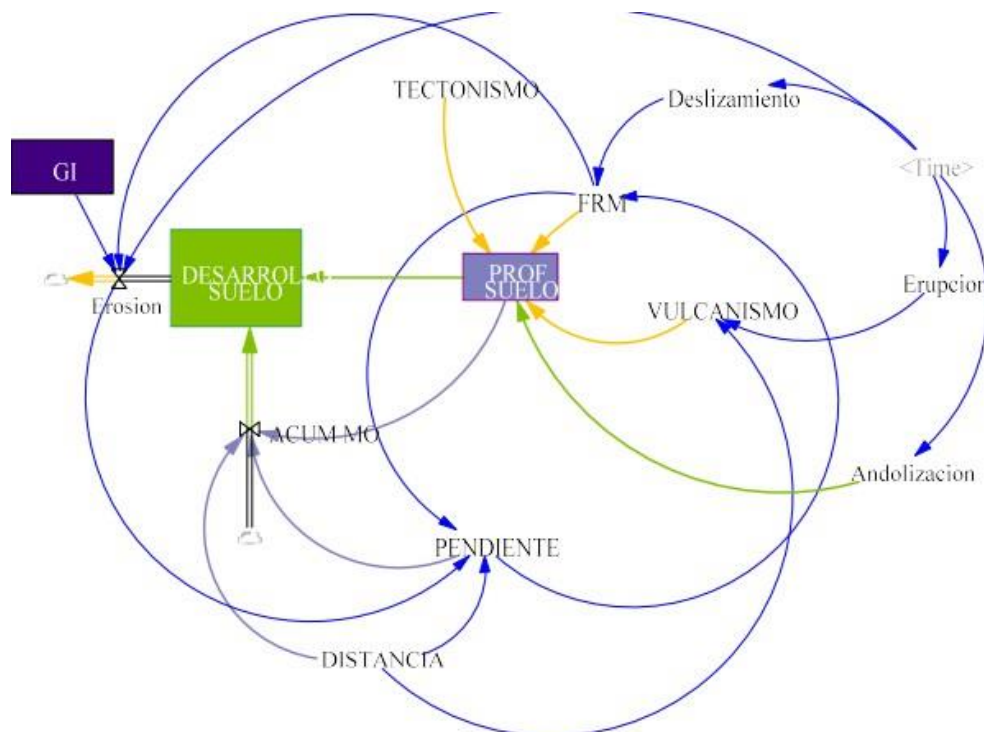
El índice de desarrollo de suelo se construye mediante un sistema dinámico en el *software* Vensim PLE v9.2.2 (Ventana Systems, 2022) a partir del diagrama de Forrester y la Ecuación 11, integrada por las relaciones empíricas descritas a continuación:

En la Ecuación 11, $ACUM_{MO}$ (variable de nivel) significa acumulación de materia orgánica y se calcula utilizando 3 variables auxiliares: distancia al edificio volcánico (Ecuación 13);

la pendiente (Ecuación 17), y la profundidad del suelo (Ecuación 18). $PROF_{suelo}$ (variable de nivel) es el material acumulado en superficie (es positiva cuando hay sedimentación y negativa cuando hay erosión), está compuesta por 4 variables auxiliares: andolización (Ecuación 19), tectonismo, FRM (Ecuación 20) y vulcanismo (Ecuación 21). *Erosión*, es el ajuste de la tasa de erosión según el índice morfodinámico utilizando la Ecuación 22, valiéndose de dos variables auxiliares que son: índice morfodinámico (Ecuación 23) y FRM (Ecuación 20). $Desarrollo_{suelo(i-1)}$ es el desarrollo de suelo en un tiempo anterior.

Estas variables se llaman variables de nivel y representan el suelo como reservorio (mediante su espesor). Sin embargo, es importante tener en cuenta que uno de los principales problemas al realizar simulaciones dinámicas, de los sistemas terrestres en superficie, es la de definir rangos realistas para las variables (Phillips, 1993). En este sentido se utilizaron las descripciones de campo y la revisión de bibliografía que, junto con el diagrama de Forrester, sirvieron para establecer las variables de nivel.

Figura 2-9: Modelo dinámico suelo-paisaje para la Quebrada Humadal

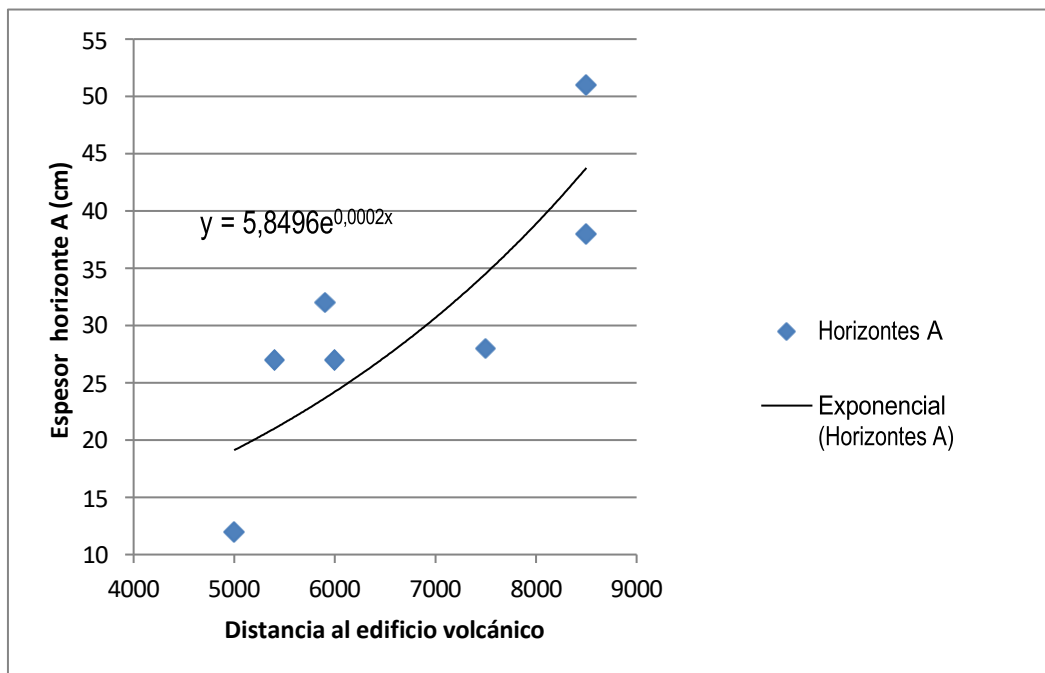


2.4.4.1 Variable de nivel 1: ACUMmo

La capacidad de acumulación de materia orgánica depende de la pendiente del terreno y del grado de alteración de los materiales. Se mide a través de la profundidad de suelo (mineral), ya que, a mayor profundidad, mayor preservación, tal y como se muestra en la Ecuación 12. En la **Figura 2-10** se muestra la relación exponencial entre el espesor del horizonte A y la distancia al edificio volcánico, además de su orden de magnitud, que sirve para agregar un término de variación de este parámetro en función de la distancia ($2e^{2*10^{-4}*Distancia}$).

$$ACUM_{mo} = 1 + (0,01 * PROF_{suelo}) + (2e^{2*10^{-4}*Distancia}) - (1,5 * Pendiente) \quad (12)$$

Figura 2-10: Tendencia exponencial de aumento de espesor del horizonte A respecto a la distancia al edificio volcánico



- **Distancia**

Es la distancia al edificio volcánico y es un rango de valores entre 500 y 6000 metros, en intervalos de 50 metros.

$$Distancia = [500, 6000] \quad (13)$$

- **Pendiente y distancia**

La pendiente se describe en porcentaje. Depende de la posición dentro de la cuenca siguiendo el perfil topográfico promedio. Además, se ve afectada por la erosión o la ocurrencia de FRM. La pendiente en función de la distancia al edificio volcánico, como se muestra en la Ecuación 14, se describe utilizando una regresión polinómica de grado 2, obtenida a partir de un perfil topográfico longitudinal. El efecto de los FRM se ajusta con la relación en la Ecuación 15, así como el de la erosión en la Ecuación 16. La pendiente final es el resultado de la suma de estas interacciones.

$$Pendiente_{dist} = [(7 * 10^{-9} * Distancia^2) - (8 * 10^{-5} * Distancia) + 0,335] \quad (14)$$

$$FRM_f = - [0,05 \left(\frac{FRM}{1 + FRM} \right)] \quad (15)$$

$$Erosion_f = - [0,05 \left(\frac{Erosion}{1 + Erosion} \right)] \quad (16)$$

$$Pendiente = Pendiente_{dist} + FRM_f + Erosion_f \quad (17)$$

2.4.4.2 Variable de nivel 2: PROFsuelo

La profundidad del suelo es el resultado de la andolización actuando sobre un material, que es expuesto por el tectonismo, y que se ve afectado por los FRM y el vulcanismo (Ecuación 5).

$$PROF_{suelo(i)} = Andolización + Tectonismo - (FRM + Vulcanismo) - PROF_{suelo(i-1)} \quad (18)$$

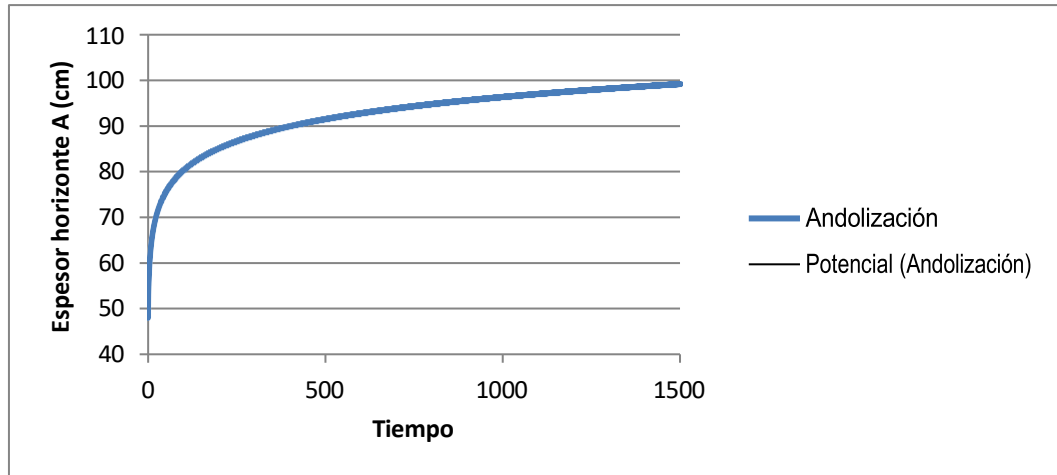
- **Andolización**

La andolización en función del tiempo se propone con una función logarítmica (**Figura 2-11**), comportamiento evidenciado por Shoji, et al., (1993) y descrito en cronofunciones por Tsai, et al. (2010), que indica el progreso de la alteración de los materiales y que se reinicia cuando el perfil de suelo es sepultado (Ecuación 13), de lo contrario alcanza un máximo a los 1000 años con 1 metro de profundidad aproximadamente, lo que equivale a una tasa de formación de andolización de 48cm por cada mil años, que es alta, comparada

con los 19 cm descritos por Peña-Ramírez et al. (2014), para paisajes volcánicos del Pléistoceno en México Central.

$$\text{Andolización} = (7 * \ln(\text{Time} + 1)) + 48 \quad (19)$$

Figura 2-11: Comportamiento logarítmico de la andolización



- **Tectonismo**

De acuerdo con lo observado en campo, el tectonismo modifica el tiempo de exposición de algunas superficies en el modelo y es un factor constante de levantamiento. Se utilizó un valor de 0.1 cm/año teniendo en cuenta que las tasas de exhumación para las Cordilleras Central y Oriental tienen tasas de 0,01cm/año (Noriega, 2016; Meléndez, et al., 2021) y en este sector la actividad es mayor. Otros autores han utilizado valores más pequeños (0,5mm/año) para describir cronofunciones en regiones tropicales (Tsai, et al., 2010)

- **Fenómenos de Remoción en Masa**

Los FRM en este modelo se entienden como eventos frecuentes a escala de una vida humana, cuyo efecto es el sepultamiento o erosión del perfil y que además modifican la pendiente. El espesor de suelo afectado varía en función de la pendiente. En la Ecuación 1, el efecto de los FRM se estima a partir del espesor promedio de depósitos coluviales identificados en campo (30cm) a través de los perfiles de suelo. El espesor varía proporcionalmente con la inclinación y un factor de magnitud empírico de 0,7. La variable “Deslizamiento” es un interruptor que indica la ocurrencia de un evento.

$$FRM = 0,7(\text{pendiente} * \text{deslizamiento} * 30) \quad (20)$$

- **Vulcanismo**

El vulcanismo se refiere a cualquier fenómeno volcánico que pueda sepultar al perfil. El aporte de material depende de la intensidad del fenómeno, pero el espesor de este es controlado por la pendiente. La Ecuación 2 se estima a partir de la relación entre los espesores de depósitos de ceniza y la variación de la pendiente con la distancia desde el edificio volcánico en la cuenca de la Quebrada Humadal. La variable “Erupción” es un interruptor, que en el año 1000 detona un fenómeno volcánico.

$$\text{Vulcanismo} = (5.8496 * e^{2*10^{-4}*Distancia}) * \text{Erupción} \quad (21)$$

- **Erosión**

La erosión se estima a partir del índice morfodinámico. Es una función logarítmica que varía dependiendo de si predominan los procesos erosivos o de agradación. Es la variable de salida del sistema.

$$\text{Erosion} = 10^{-0.4*(GI-(FRM*0.01))} * \text{Ln}(\text{Time} + 1) + 3 \quad (22)$$

2.5 Resultados

2.5.1 Susceptibilidad

Al evaluarla susceptibilidad a FRM, se calculó el peso por evidencia (Wf) para cada categoría de los factores condicionantes (Fase 1; **Figura 2-4**). En el caso de la pendiente se definieron 7 rangos de inclinación (0-3%, 1;3-7%, 2;7-12%, 3; 12-25%, 4; 25-50%, 5; 50-75%, 6; >75%, 7) como se muestra en la **Tabla 2-2**. Puede observarse que la relación con la ocurrencia de FRM es positiva en la clase 7 cómo lo muestra el valor de Wf. Este valor positivo se asocia a las pendientes escarpadas. Asimismo, la **Tabla 2-3** muestra para las geoformas, que Wf es positiva en los escarpes de erosión (Deem), lomos residuales

(Dires), escarpe de terraza de acumulación (Ftae) y en los lóbulos de flujo piroclástico (Vlfp). En la geología (Anexo Tabla 2-18), destaca el peso de la Formación Las Mesas (Pardo et al., 2019), en todos sus miembros. Para la curvatura, la distribución fue indistinta en topografías cóncavas y convexas (Anexo Tabla 2-19). La distancia a drenajes presentó relaciones positivas entre los 100 y 200 metros (Anexo Tabla 2-20). Al realizar la suma y normalización (ArcGIS), es decir, reescalar según el valor máximo del Wf total, se obtiene el mapa de la **Figura 2-12**. En este mapa se puede ver que la mayor susceptibilidad es en escarpes de lóbulos piroclásticos. En contraste, la susceptibilidad es moderada en geoformas erosivas como la ladera noroccidental y baja en los planos de lóbulos.

Tabla 2-2 Valores de pesos de evidencia para categorías de la pendiente

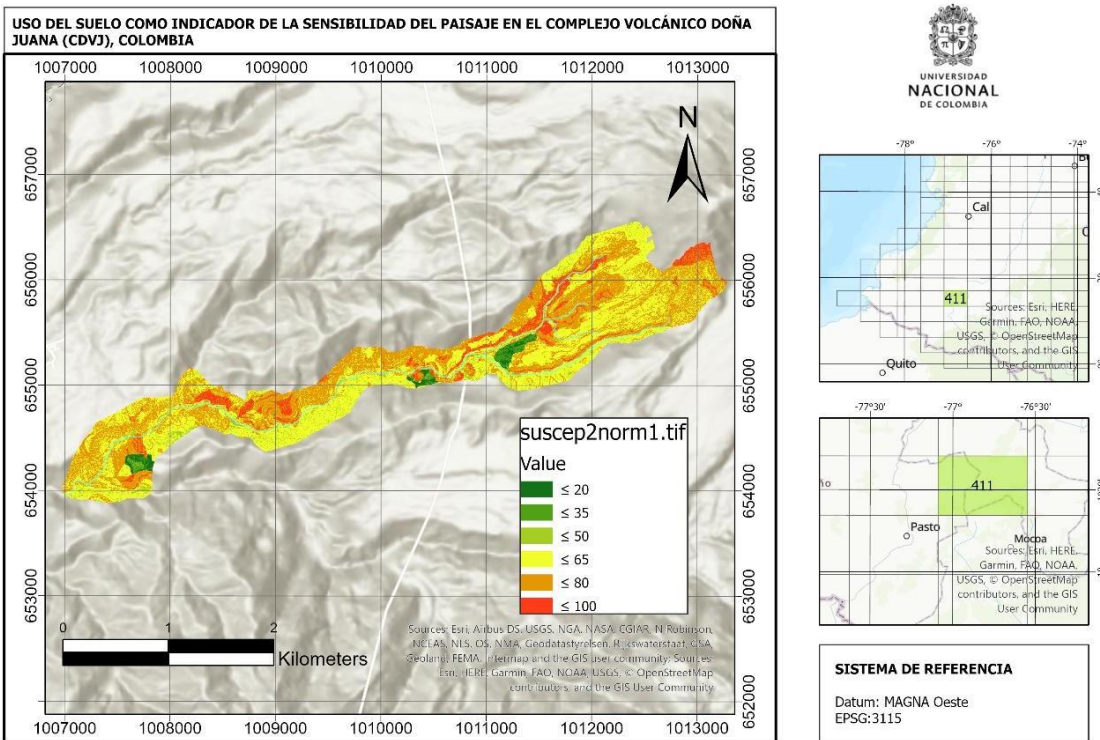
Pendiente	Wi+	Wi-	Wf
1	-0,473	0,001	-0,474
2	-0,617	0,005	-0,621
3	-0,834	0,011	-0,845
4	-0,972	0,045	-1,017
5	-0,742	0,107	-0,849
6	-0,155	0,041	-0,196
7	0,315	-0,458	0,773

Tabla 2-3. Valores de pesos de evidencia para cada geoforma

Forma del terreno	Wi+	Wi-	Wf
Vfpe	0,835	-0,146	0,689
Vlfp	1,870	-0,028	1,842
Sefes	0,990	-0,044	0,946
Slfe	-1,279	0,191	-1,088
Ftae	0,585	-0,017	0,568
Fta	-5,314	0,016	-5,298
Fca	-0,522	0,010	-0,512
Ddi	-1,728	0,009	-1,719

Deeme	1,213	-0,003	1,210
Deem	0,460	-0,058	0,402
DIres	0,555	-0,047	0,508
Dpcr	-0,620	0,036	-0,583
Del	-0,556	0,042	-0,514
Dft	-0,141	0,045	-0,096

Figura 2-12: Mapa de susceptibilidad normalizada a FRM



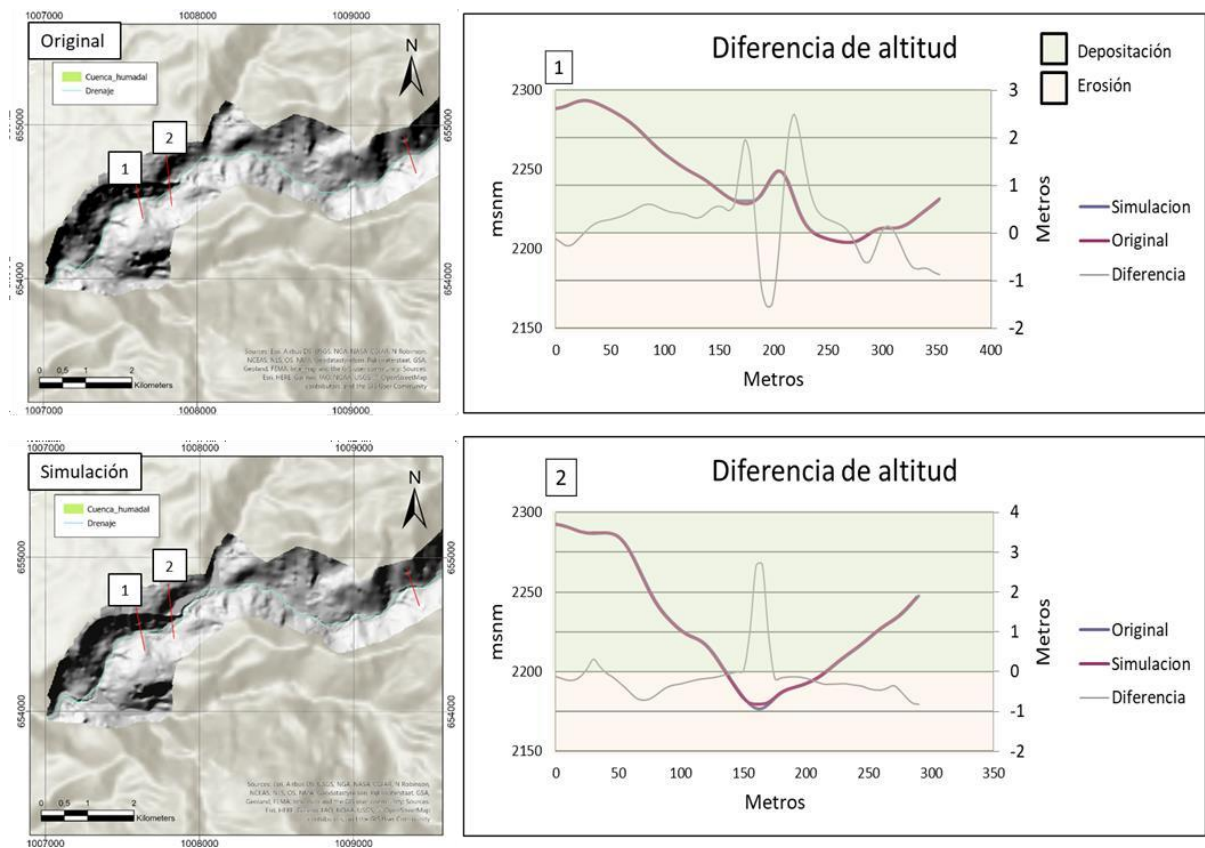
2.5.2 Simulación de erosión

La **Figura 2-13** muestra los DEM resultado de la simulación de erosión. Sobre los DEM (izquierda) se hicieron dos perfiles topográficos (raya roja números 1 y 2). El perfil 1 (imagen superior izquierda) indica la depositación predominante en la parte baja de la ladera y erosión en los escarpes. El perfil 2 muestra la socavación en el cauce de la quebrada. Estos son dos ejemplos de cómo se opera la simulación de erosión para

procesos de ladera (erosión laminar y FRM), donde se muestra en la margen derecha el perfil topográfico inicial, la simulación de erosión y la diferencia.

Con base en el análisis de la simulación de erosión y los perfiles topográficos, se encontró que la depositación en terrazas aluviales, la erosión en los escarpes de las márgenes del cauce de la Quebrada Humadal y la ocurrencia de deslizamientos en áreas escarpadas son los procesos más significativos. En la **Figura 2-13** Se puede notar que los procesos erosivos en las laderas adyacentes a los drenajes tienen pérdidas de hasta 2 metros de material y hay acumulación en las terrazas y valles con órdenes de magnitud similares.

Figura 2-13: Procesos de erosión y depósito en simulación con CAESAR-Lisflood. A) Acumulación de material formando una terraza aluvial. B) Erosión por deslizamientos en escarpe.



2.5.3 Índice morfodinámico (GI)

El GI se calculó para toda la cuenca como el logaritmo de Δh multiplicado por la susceptibilidad a FRM normalizada ($NSus_{FRM}$). El Δh del GI se calculó como se observa en la **Figura 2-13**. A la simulación de erosión hecha con CAESAR-Lisflood para 10 años, se le resta el original (tomado del DEM (Salazar, et al., 2022)) se obtiene un ráster de valores de cambio de altura. Esa diferencia corresponde a los distintos Δh en la cuenca. Sin embargo, Δh se ajusta dado que las diferencias son pequeñas y el orden de magnitud es diferente al de la susceptibilidad. Por esta razón se toma el logaritmo de Δh y se define un condicional para su signo, positivo si Δh es positivo y negativo de lo contrario.

Al superponer el mapa (**Figura 2-14**) con el polígono de cada geoforma definida por Salazar et al., (2022), se estiman las variables estadísticas que se muestran en la **Tabla 2-4** y que se usaron para definir los escenarios de la simulación dinámica. En esta tabla se resaltan en naranja los valores mínimos que indican erosión.

La **Figura 2-14** muestra el resultado en ArcGIS de GI, donde predomina la tendencia a la depositación en la cuenca a excepción del cauce actual de a Quebrada Humadal y los escarpes de erosión y ladera erosiva (ver mapa geomorfológico para las unidades geomorfológicas en Salazar et al., (2022)).

Figura 2-14 En azul se observan las zonas de erosión y morado las de depositación. Se puede observar que las zonas que presentan mayor cambio son las que se relacionan al

cauce aluvial y los sectores escarpados. Las geofomas más estables son los planos de lóbulos aterrizados.

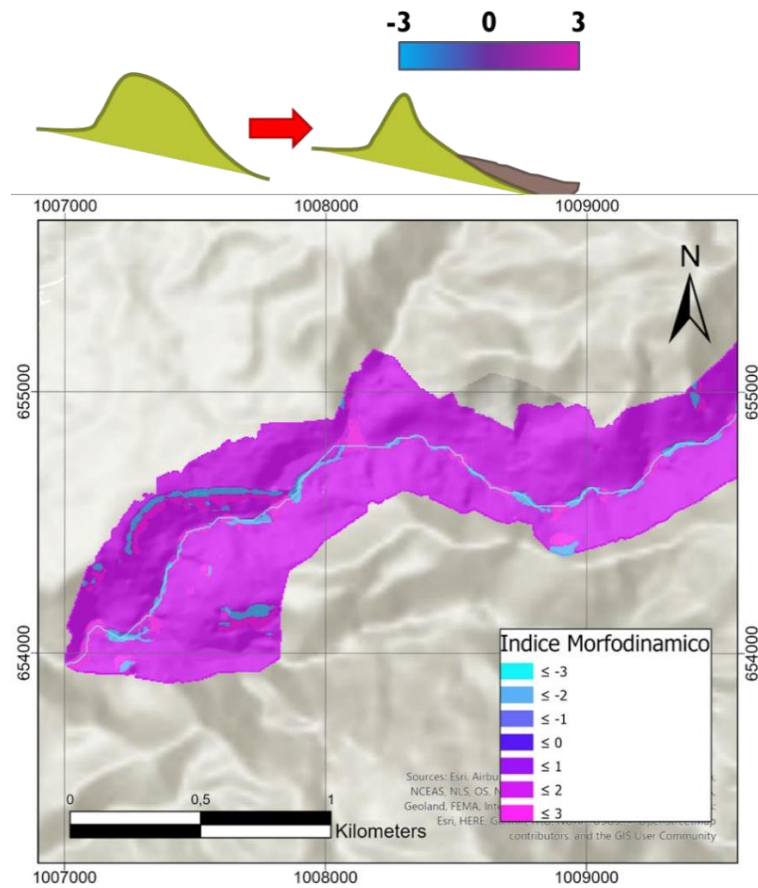


Tabla 2-4: Valores del Índice Geomorfológico para las unidades geomorfológicas de la Quebrada Humadal

Símbolo	Nombre	IG promedio	Desv. Estándar	Mayoría	Minoría
Deem	Escarpe de erosión menor	1,78	0,77	1,89	-3,03
Dle	Ladera erosiva	1,61	0,84	1,79	-2,99
Dlres	Lomo residual	1,81	0,52	1,88	-2,89
Sefes	Epolón festoneado	1,81	0,45	1,86	-2,62
Sife	Escarpe de línea de falla	1,75	0,79	1,9	-2,78
Vfpe	Escarpe de flujo piroclástico aterrizado	1,55	1,12	1,83	-3,04

Vfp	Flujo piroclástico aterrazado	1,63	0,78	1,75	-2,96
Vlfp	Lóbulo de flujo piroclástico	1,78	0,43	1,79	-3,05
	PROMEDIO	1,72	0,71	1,84	-2,92

2.5.4 Índice pedológico en el modelo dinámico

El modelo dinámico contrasta los procesos de erosión, sedimentación y pedogénesis e indica el producto del proceso (superficie decapitada, agradación de una superficie (cumulización), o la formación de suelo). Partiendo de las evidencias en los suelos, y los factores que explican su desarrollo, hay dos forzamientos que intervienen en la pedogénesis: En escalas de tiempo cortas, los FRM y, en escalas temporales más largas, el vulcanismo y el tectonismo. Por otro lado, los factores como la pendiente y la distancia al edificio volcánico potencializan/amortiguan el grado de afectación. Los FRM y el vulcanismo afectan el tiempo de exposición de una superficie al sepultar material. El tectonismo, por su parte, permite la exposición prolongada de los depósitos. La pendiente reduce el efecto del vulcanismo sobre la pedogénesis, aunque la intensidad de esta variable es aleatoria. Además, la pendiente es regulada por los procesos erosivos.

En resumen, la suma de interacciones es compleja, por lo cual se evaluó el comportamiento del modelo dinámico en condiciones extremas para simplificar el análisis. Se definieron cuatro escenarios en posiciones geomorfológicas contrastantes como se ve en la **Tabla 2-5**.

Tabla 2-5: Escenarios evaluados en el modelo

Variable	Escenario 1 (ladera)	Escenario 2 (plano de lóbulo)	Escenario 3 (zona proximal)	Escenario 4 (zona distal)
GI	-2.5	1.5	0	0

Distancia al edificio volcánico (m)	1500	1500	0	6000
Espesor inicial (cm)	50	50	50	50
Pendiente (%)	30	3	15	3

Para cada escenario el índice de desarrollo de suelo muestra el espesor total de material de suelo en un momento determinado. La interpretación de los quiebres en la pendiente causados por los FRM (Δy) depende del signo del índice morfodinámico (GI), para signos positivos representa el sepultamiento del perfil, y para signos negativos, la pérdida de un espesor determinado.

Escenario 1 (**Tabla 2-5**): En la **Figura 2-15** se representa el caso del escenario de ladera (GI=-2.5), con una pendiente inicial de 30% y en la parte media de la cuenca. Por defecto se inicia con 50cm de suelo, en este caso la erosión predomina sobre la edafogénesis y se pierden 10cm a lo largo de 1000 años hasta que un fenómeno volcánico sepulta el perfil. Morfológicamente se puede entender como un suelo truncado combinado (*compound truncated*) de perfil tipo A-C-2Bb.

Escenario 2 (**Tabla 2-5**): En el caso de un suelo que se desarrolla bajo condiciones externas similares, pero ubicado en la parte distal de la cuenca sobre el plano del lóbulo piroclástico (GI = 1.5), la pedogénesis predomina sobre el efecto de los FRM generando un primer perfil cumúlico (*cumulic*) y después del fenómeno volcánico, un segundo perfil con alto grado de andolización (**Figura 2-16**). Morfológicamente es un perfil combinado (*compound*) pero con proceso de cumulización superpuesto en una sucesión A-C-2Ab-3Bb-3C.

Figura 2-15: Simulación para el caso de una ladera

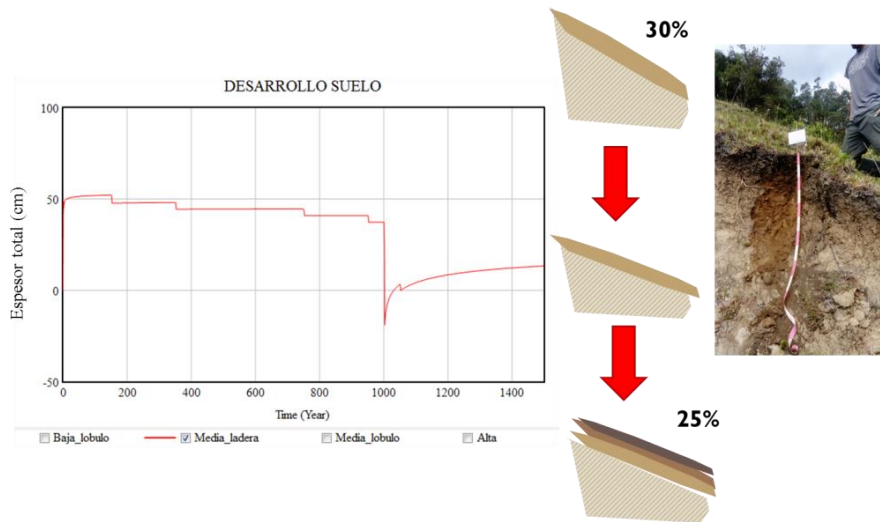


Figura 2-16: Simulación para el caso de la parte baja de la cuenca sobre plano de lóbulo

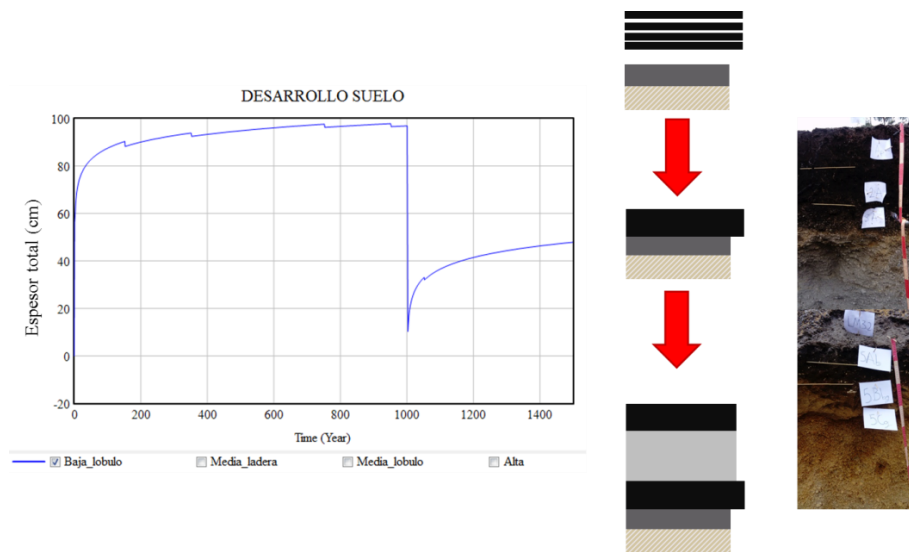
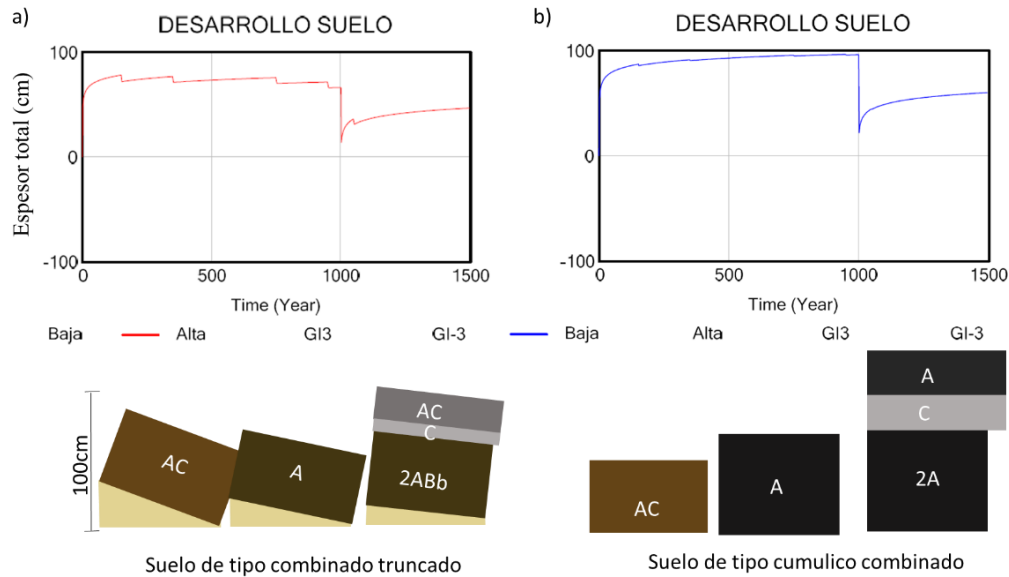


Figura 2-17: Escenarios 3 y 4, zona proximal (a) y distal(b)

Escenario 3 (**Figura 2-17, a**): Un perfil que se desarrolla en la parte proximal del edificio volcánico tiene una pendiente moderada, está más susceptible a procesos de erosión y el volumen de material volcánico y materia orgánica que se acumula es menor. Morfológicamente es un perfil combinado truncado (*compound truncated*) debido a que los FRM erosionan el horizonte AC inicial y, si bien hay pedogénesis, cuando el suelo es sepultado se reinicia su desarrollo.

Escenario 4 (**Figura 2-17, b**): La parte distal del edificio volcánico se caracteriza por tener pendientes planas, baja susceptibilidad a FRM, alta acumulación de material volcánico y materia orgánica. Esto permite el desarrollo de horizontes A profundos y oscuros. Morfológicamente es un perfil combinado (*compound*), con procesos de cumulización, dado que no hay erosión o pérdida del horizonte A y la sedimentación, asociadas a FRM, es menor a la tasa de pedogénesis.

El análisis de desarrollo de suelo para los escenarios es consistente con Kraus (1999), que define suelos combinados (*compound*) cuando la tasa de depósito es mayor a la de erosión y a la pedogénesis. Tal es el caso de los suelos del tramo bajo de cuenca y en planos de lóbulo, que están separados de los paleosuelos por niveles espesos de depósitos piroclásticos. Sin embargo, procesos de menor magnitud como los FRM permiten el

desarrollo de secciones cumúlicas o truncadas, dependiendo de la posición geomorfológica.

2.5.5 Sensibilidad del modelo dinámico a condiciones iniciales

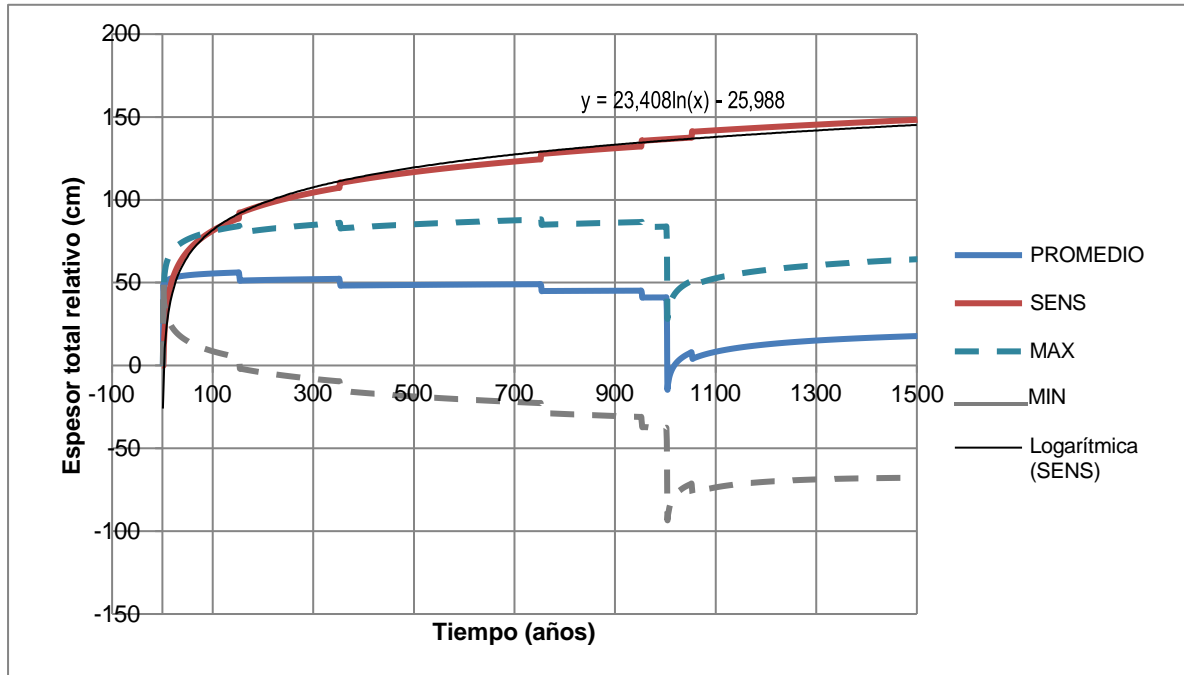
En relación con la sensibilidad del sistema, como se mostró en la Ecuación 9, esta se entiende como la distancia entre dos trayectorias seguidas por el modelo bajo condiciones iniciales distintas que, en función del tiempo, se alejan exponencialmente (Cencini, et al., 2010)

Entonces, la sensibilidad, en este caso, puede expresarse como la diferencia entre dos escenarios extremos frente a una variable, en función del tiempo (Figura 2-16).

$$S_{VAR(t)} = \Delta Sim(t) \quad (23)$$

De esta manera, la erosión, condicionada principalmente por el índice morfodinámico (GI), muestra la mayor diferencia con el tiempo frente a los dos casos extremos que serían la ladera y el plano de lóbulo. Esto se explica por el paso de un régimen erosivo a uno depositacional. En la **Figura 2-18** se representa el aumento en la sensibilidad, en relación con el tiempo, para el caso de ladera (GI=-2.5) y plano de lóbulo (GI=1.5), alcanzando una diferencia máxima de 150cm y evidenciando un comportamiento logarítmico. En el caso de la distancia al edificio volcánico (**Figura 2-19**), la sensibilidad no es alta, un orden de magnitud menor que frente al GI, aunque se acusa en los eventos de FRM. Por otro lado, el pico negativo de la sensibilidad a los 1000 años indica que el fenómeno volcánico tiene mayor control sobre el desarrollo que otros factores

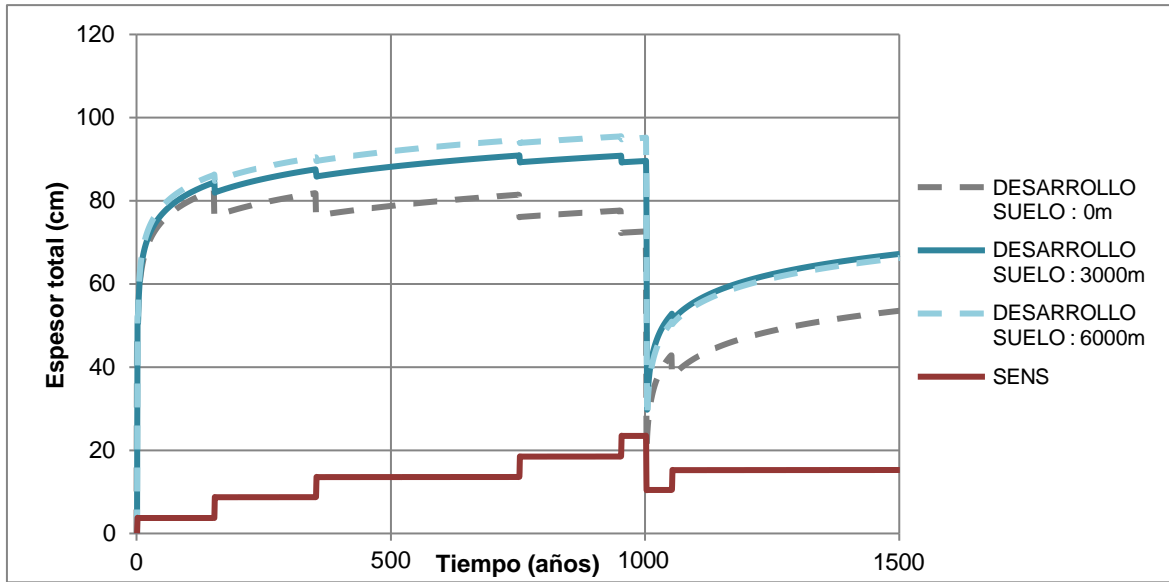
Figura 2-18: Diferencia entre casos extremos del índice morfodinámico



La sensibilidad describe el comportamiento del modelo. Phillips (1992), plantea un método cualitativo para categorizar sistemas estables, generalmente caóticos o potencialmente caóticos, a partir de la identificación de los signos de los exponentes de Lyapunov, indicando que un sistema es asintóticamente estable cuando estos son iguales a 0, si son todos negativos es asintóticamente inestable y si al menos uno es positivo es potencialmente caótico. Acorde con la curva de sensibilidad (**Figura 2-20**), su tendencia al crecimiento (Ecuación 24), indica que al menos existe un exponente de Lyapunov positivo, sin embargo, el crecimiento es mermado por ciclos de retroalimentación negativa que generan un atractor, como se evidencia en el comportamiento del logaritmo de la sensibilidad (**Figura 2-20**). De esta manera, el comportamiento del sistema puede considerarse potencialmente caótico con un atractor.

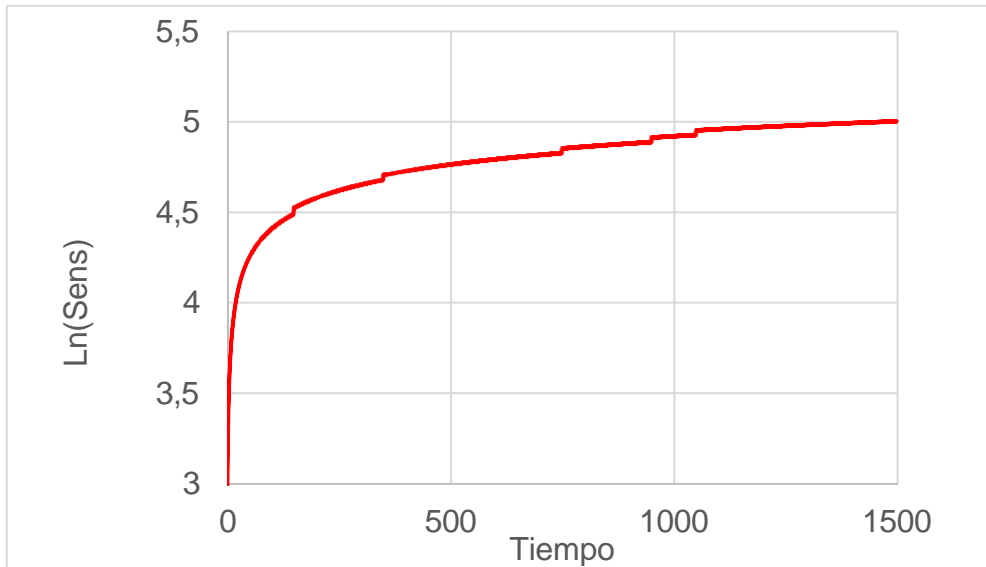
$$\lim_{t \rightarrow \infty} 23,4 \ln(t) - 25,98 = \infty \quad (24)$$

Figura 2-19: Diferencia entre casos extremos de distancia al edificio volcánico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-20: Comportamiento del logaritmo de la sensibilidad, evidenciando la disminución de su pendiente con el tiempo, asociada a un atractor.



Fuente: Elaboración propia

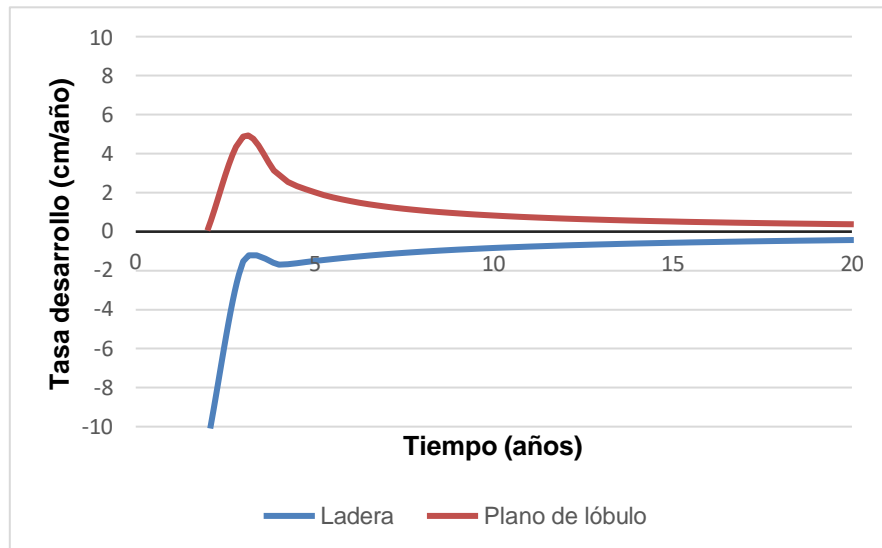
2.6 Discusión

2.6.1 Implicaciones frente a la evolución del paisaje

El análisis de sensibilidad indica condiciones potencialmente caóticas (sec. Phillips (1992; 1993)). Si bien, a diferencia de Phillips (*ibid.*) cuyo trabajo es cualitativo en cuanto a las interacciones de las variables, y este trabajo las describe con funciones empíricas, se logra exponer en concordancia el comportamiento de los sistemas pedológicos como potencialmente caóticos, pero regulados por ciclos de reoalimentación negativa. Es decir, hay un control para el desarrollo de suelos condicionado por la evolución de las geoformas.

En otras palabras, geoformas con dominio de la depositación como los planos de lóbulos de piroclastos tenderán a presentar suelos similares con el tiempo, esto ocurrirá mientras no haya un evento de tal magnitud que modifique las propiedades de la geomorfa o su régimen erosivo, cosa que ocurre en las áreas de transición entre plano y ladera. La distribución de superficies geomorfológicas de diferentes edades y diferentes regímenes erosivos la explica la variabilidad espacial y taxonómica de los subgrupos de suelo. Esto concuerda con los estudios de escenarios teóricos de diferentes cronosecuencias realizados por Phillips (Phillips, 2015; Phillips, 2016; Phillips, 2021) en el que bajo sistemas caóticos los perfiles de suelo se complejizan.

Por otro lado, reconocer el atractor permite hablar en términos de resiliencia del paisaje, pues si bien el desarrollo de suelo se limita con el tiempo, a su vez, la pérdida de suelo en zonas de ladera. Como se muestra en la **Figura 2-21** para la situación simulada, en los primeros 10 años sin ocurrencia de FRM se estabilizan las tasas de erosión o pedogénesis. Los andisoles son suelos resilientes (Ivelic-Sáez, et al., 2015; Anda & Dahlgren, 2020; Gomez, et al., 2022) por lo cual, identificar estas condiciones que favorecen la estabilidad permite tomar medidas de restauración ecológica.

Figura 2-21 Evolución de la tasa de desarrollo

Fuente: Elaboración propia

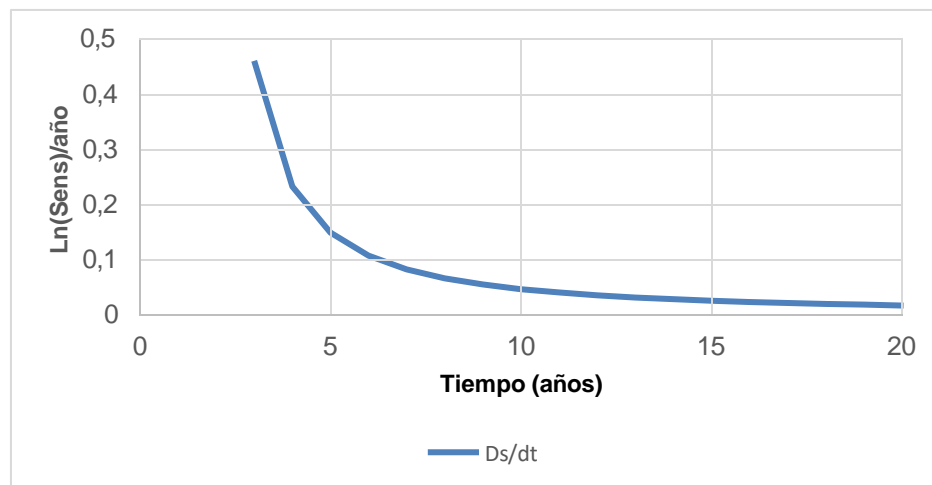
2.6.2 Implicaciones frente a estudios de amenaza

El modelo que presentamos está de acuerdo con los sistemas dinámicos complejos de Phillips (1998) en contraposición al modelo multifactorial de Jenny (1941). Modelar el sistema suelo-paisaje, está limitado por el fenómeno de agregación y emergencia asociado a cambios en la escala de estudio e interacción de componentes (Anderson, 1972; Johnson, 2001; Costanza & Alexey, 2004). En este sentido, los razonamientos deductivos, como las funciones empíricas, tal como los inductivos, relacionados a la construcción del modelo, presentan incertidumbre debido a variables no contempladas o explicadas. Aunque las funciones empíricas, principalmente la andolización, sigan las tendencias y comportamientos reportados en la bibliografía (Shoji, et al., 1993; Tsai, et al., 2007; Takahashi & Dahlgren, 2016), el modelo no contempla otras rutas evolutivas que pueden darse en simultáneo (*multipath, sensu Philips (2019)*). Sin embargo, el análisis de robustez en las simulaciones presenta valores que están acorde con la información utilizada como insumo y los conceptos sobre clasificación de suelos por régimen erosión/depositación/pedogénesis presentados por Kraus (1999). En consecuencia, es necesario validar el modelo, utilizando información proveniente de otros sistemas bajo condiciones homologables.

Pese a estas limitaciones conceptuales, este método significa dar un paso al razonamiento sistémico frente a la evolución del paisaje, desde la causalidad. Peña (2014), quien hace un modelo dinámico de las condiciones que generan deslizamientos en Manizales, señala que estos instrumentos permiten mejorar la planificación, al ser insumos que facilitan el desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana.

Otro elemento que se hace evidente bajo esta mirada es el de las geoformas como un continuo, que se transforma, lo que da pie a contemplar, dentro de la cartografía de amenazas, áreas de buffer de transición entre geoformas, o procesamiento por lógica difusa. Adicionalmente, evaluar tiempos de validez de la cartografía. En el caso simulado los primeros 10 años son los de mayor tasa de divergencia como se muestra en la **Figura 2-22**, que se relacionarían a una mayor incertidumbre durante este periodo.

Figura 2-22: Grado de divergencia entre escenarios



Fuente: Elaboración propia

2.7 Conclusiones

La sensibilidad, permite tener una visión más completa de una situación de cambio, las repercusiones de éste sobre cada componente del sistema a través del tiempo y las áreas donde es más intenso. Además de identificar procesos de autorregulación y la evolución de un sistema. Lo cual, en efectos prácticos para estudios de amenaza, implica considerar

zonas de transición entre geoformas y tiempos de validez de la cartografía, en función de las trayectorias del sistema. Particularmente cuando el comportamiento de estos es caótico.

Esta herramienta también permite visualizar las condiciones que explican la variabilidad morfológica y distribución espacial de subgrupos taxonómicos de suelo. En la parte alta cuenca de la Quebrada-Humada la morfología de los suelos está dominada por la erosión laminar dando lugar a la formación de suelos de bajo grado de desarrollo, de poco espesor en perfiles combinados; en la parte media, influyen más los FRM, y los suelos tienen moderado grado de desarrollo, y espesor, en perfiles combinados truncados; y en la parte baja, los depósitos de fenómenos volcánicos permiten la formación de suelos desarrollados, profundos en perfiles cumúlicos combinados.

Finalmente, el modelo tiene limitaciones, pero abre el camino para la implementación de otras herramientas dentro de la complejidad, lógica difusa y la cartografía dinámica para la gestión del riesgo (SAT) y el ordenamiento territorial.

2.8 Referencias

- Aguilar, D. y otros, 2018. *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional, metodología a escala general (1:100000)*. Bogotá, D.C.: UPRA.
- Anda, M. & Dahlgren, R., 2020. Long-term response of tropical Andisol properties to conversion from rainforest to agriculture. *Catena*, Issue 194, pp. 1-13.
- Anderson, P. W., 1972. More is different. *Science*, 1972(4047), pp. 393-396.
- Aracil, J., 1995. *Dinámica de sistemas*. Primera ed. Madrid, España: Isdefe.
- Aristizábal, E. y otros, 2019. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal, y magnitud. *Boletín de Geología*, 41(3), pp. 85-105.
- Australian Geomechanics Society, 2007b. Commentary on guideline for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning.. *Aust Geomech*, Volumen 1, pp. 37-62.

- Brierley, G., 2010. Landscape memory: the imprint of the past on contemporary landscape forms and processes. *Area*, 1(42), pp. 76-85.
- Brunsdon, D., 2001. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena*, Volumen 42, pp. 99-103.
- Brunsdon, D. & Thornes, J. B., 1979. Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers*, Issue 4, pp. 463-484.
- Butler, B. E., 1959. Periodic phenomena in landscapes as a basis for soil studies. *CSIRO Australia soil publication*, Issue 14.
- Cardona, N. & Serna, M., 2019. *Análisis en la implementación de la Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa, escala 1:25000 del SGC en la vereda Kerman, Municipio de Quimbaya, Quindío*, Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- Cencini, M., Cecconi, F. & Vulpiani, A., 2010. *Chaos: From simple models to complex systems*. Primera ed. London: World Scientific.
- Costanza, R. & Alexey, V., 2004. Spatially Explicit Landscape. En: R. Costanza & V. Alexey, edits. *Landscape simulation modeling*. New York: Springer, p. 345.
- Coulthard, T., Macklin, M. & Kirkby, M., 2002. A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volumen 27, pp. 269-288.
- Einstein, H., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. En: *Technical Bulletin No. 1026, USDA Soil Conservation Service*. s.l.:US Department of Agriculture..
- FAO, 1981. *A framework for land evaluation*. Roma: FAO Soils bulletin 32.
- Giraldo-Obando, J., 2012. *Zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en el corregimiento de Las Mesas, municipio de El Tablón de Gómez, departamento de Nariño*, San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- Gomez, F., von Müller, A., Tarabini, M. & La Manna, L., 2022. Resilient Andisols under silvopastoral systems. *Geoderma*, Volumen 418, pp. 1-16.
- Huggett, R. J., 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. *Geoderma*, Issue 13, pp. 1-22.
- Huggett, R. J., 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*, Issue 32, pp. 155-172.
- Huggett, R. J., 2011. *Fundamentals of geomorphology*. Third edition ed. New York, EEUU: Routledge.

- IDEAM, 1999. *El Macizo Colombiano y su área de influencia*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- IDEAM, 1999. *El Macizo Colombiano y su área de influencia*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Ivelic-Sáez, J. y otros, 2015. Functional resistance and resilience of the pore system of an andisol exposed to different strategies of pasture improvement under sheep grazing. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 3(15), pp. 663-679.
- Johnson, S., 2001. *Sistemas emergentes: o qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudad es y software*. Primera ed. México, DF: Fondo de cultura económica, para América Latina.
- Kraus, M., 1999. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. *Earth-Science Reviews*, Issue 47, pp. 41-70.
- Lopez-Lopez, D., 2016. Geoespacial analysis and modelling to map socienvironmental sensitivity of landscape to impact of extreme events in the Usamacinta Watershed. *Modern Environmental Science and Engineering*, 2(6), pp. 417-426.
- Meléndez, H. y otros, 2021. Levantamiento orogénico alrededor del bloque Soapaga, Cordillera Oriental de Colombia: Inferencias del modelado termocinemático, geomorfología y sismicidad. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2), pp. 1-30.
- Mendoza, M. y otros, 2009. *Análisis de la aptitud territorial, una perspectiva biofísica*. Primera ed. México D. F.: INE.
- Noriega, S., 2016. *Geomorfología tectónica del noroccidente de la Cordillera Central Andes del Norte -Colombia*, s.l.: s.n.
- Pardo, N., Pulgarín, B. & Betancourt, V., 2016. *Avances en el conocimiento sobre el complejo volcánico Doña Juana: Integración del análisis de litofacies, estratigrafía, geocronología y petrología*, Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Pardo, N. y otros, 2018. Facing geological mapping at low-latitude volcanoes: The Doña Juana Volcanic Complex study-case, SW-Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Peña, C. A., 2014. *Monitoreo y modelo sistémico a deslizamiento superficial de suelos para Manizales*, s.l.: Universidad Nacional de Colombia.
- Peña-Ramírez, V., Vázquez-Selem, L. & Siebe, C., 2014. Rates of pedogenic processes in volcanic landscapes of late Pleistocene to Holocene age in Central Mexico. *Quaternary International*, pp. 1-15.

- Phillips, J., 2016. Complexity of Earth Surface System Evolutionary Pathways. *Mathematical Geoscience*, p. 23.
- Phillips, J., 2019. Evolutionary pathways in soil-geomorphic systems. *Soil Science*, 184(1), pp. 1-12.
- Phillips, J., 1992. Qualitative chaos in geomorphic systems, with an example from wetland response to sea level rise. *The Journal of geology*, Volumen 100, pp. 365-374.
- Phillips, J., 1993. Chaotic evolution of some coastal plain soils. *Physical geography*, 14(6), pp. 566-580.
- Phillips, J., 2015. The robustness of chronosequences. *Ecological Modelling*, Volumen 298, pp. 16-23.
- Phillips, J., 2016. Complexity of Earth Surface System Evolutionary Pathways. *Mathematical Geosciences*, Volumen 48, pp. 743-765.
- Phillips, J., 2021. *Landscape Evolution. Landforms, Ecosystems , and Soils*. PRimera ed. s.l.:Elsevier.
- Phillips, J. D., 1999. *Earth surface systems - Complexity, order and scale*. Oxford: Blackwell.
- Rosignol, J., 1987. *Lamorfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales, conceptos y primeras aplicaciones en méxico*. Primera ed. México D. F.: IIRB.
- Salazar, S. y otros, 2022. Geomorphology in a tropical volcanic setting: interplay of fluvial gravitational, structural, and volcanic processes in the Doña Juana Volcanic Complex, Colombia. *Journar of maps*, Volumen Sometido.
- SGC, 2014. *Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100000 Plancha 411 - La Cruz*, Bogotá D. C.: SGC.
- SGC, 2015. *Memoria explicativa, Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100000 Plancha 411- La Cruz*, Bogotá D. C.: SGC.
- SGC, 2016. *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala detallada*. Bogotá D.C.: SGC.
- SGC, 2017. *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por moviimientos en masa. Escala 1:25000*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Shoji, S., Nanzyo, M. & Dahlgren, R., 1993. *Volcanic Ash Soils — Genesis, Properties and Utilization*. Amsterdam: Elsevier.
- Takahashi, T. & Dahlgren, R. A., 2016. Nature, properties and function of aluminum–humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, Issue 263, pp. 110-121.

- Thomas, M., 2001. Landscape sensitivity in time and space - an introduction. *Catena*, Issue 42, pp. 83-98.
- Tricart, J., 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Primera ed. Paris, Francia: Masson et cis.
- Tsai, C. y otros, 2010. Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma*, Issue 156, p. 48–59.
- Tsai, H., Zeng-Yei, H., Wen-Shu, H. & Zueng-Sang, C., 2007. Pedogenic approach to resolving the geomorphic evolution of the Pakua river terraces in central Taiwan. *Geomorphology*, Issue 83, pp. 14-28.
- Van de Wiel, M., Coulthard, T., Macklin, M. & Lewin, J., 2006. Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, Volumen 90, pp. 283-301.
- Ventana Systems, 2022. *Vensim PLE v9.2.2*. s.l.:<https://vensim.com/download/>.
- Weldu, W., Derribew, I., Tekalign, S. & Uttama, R., 2018. Spatial Modeling of Soil Erosion Risk and Its Implication for Conservation Planning: the Case of the Gobebe Watershed, East Hararghe Zone, Ethiopia. *Land*, 7(1), p. 25.
- Weldu, W. & Edo, H., 2020. Effect of Land Use and Land Cover Change on Soil Erosion in Erer Sub-Basin, Northeast Wabi Shebelle Basin, Ethiopia. *Land*, 9(4), p. 111.
- Wilcock, P. & Crowe, J., 2003. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, Volumen 129, pp. 120-128.

A. Anexo: Descripción de los perfiles de suelo

El perfil LM3 (**Tabla 2-6**) se encuentra en el plano de un lóbulo piroclástico sub-reciente, se trata de una sucesión de un suelo y un paleosuelo con horizontes Ap-2A-3A-3C y 5ABbg-5Bbg-5Cg respectivamente. El horizonte Ap tiene un espesor de 22 cm; color negro; textura franco arcillo limosa con frecuentes fragmentos de gravilla; los siguientes horizontes son subdivisiones debido a contrastes texturales, el horizonte 2A tiene 18cm de espesor y textura arenosa; el horizonte 3A es de 15 cm y tiene una textura arenosa con fragmentos de gravilla. El paleosuelo tiene un horizonte 5ABbg de 12cm con color pardo intenso y moteados amarillo rojizo; una textura arenosa franca y pocos fragmentos de gravilla, en el horizonte 5Bbg, de color pardo intenso, persisten los moteados, tiene un espesor de 12cm y una textura arenosa franca con pocos fragmentos de roca tamaño gravilla.

Tabla 2-6: Descripción morfológica perfil LS2

Prof (cm)	Descripción
Ap 0-32	Horizonte mineral de color negro (10YR 2/1) con moteados pardo intenso (7.5YR 5/6) en un 15%; con una textura arcillosa con muchos fragmentos de roca tamaño gravilla; estructura blocosa angular fina a media y de grado débil; consistencia en húmedo muy friable y en mojado no pegajosa y no plástica; muchos poros tubulares e irregulares finos a medianos y continuos; con frecuentes raíces finas, vivas. Un límite claro con topografía plana.
C 32-117	Horizonte mineral de color pardo amarillento oscuro (10YR 7/6) y pardo amarillento (10YR 5/6), con textura arenosa y abundantes fragmentos de roca tamaño gravilla; sin estructura, suelta; consistencia en húmedo suelta y en mojado no pegajosa y no plástica; frecuentes poros irregulares, finos a medianos y continuos; frecuentes raíces finas, vivas y muertas. Un límite claro con topografía plana.
2Ab1 117-135	Horizonte mineral de color pardo muy oscuro (10YR 2/2) y moteados pardo intenso (7.5YR 4/6) en un 5%; textura franco arcillo arenosa; estructura blocosa sub-angular fina a media con grado débil; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; con frecuentes poros finos y medios, tubulares, continuos; frecuentes raíces finas, vivas y muertas. Un límite claro con topografía plana
2Ab2 135-185	Horizonte mineral de color negro (10YR 2/1) y pardo amarillento (10YR 5/6), con textura franco arcillo arenosa y fragmentos de roca; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; con frecuentes poros tubulares y continuos; pocas raíces finas, vivas y muertas. Tiene un límite claro con topografía plana.
2BC 185-211	Horizonte mineral de color pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) y pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en un 30%, con textura franca y

	fragmentos de roca; con estructura blocosa sub angular fina a media con grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros tubulares, finos a medianos y continuos; frecuentes raíces finas, vivas y muertas. Un límite claro con topografía plana.
3C 211-271	

Tabla 2-7: Descripción morfológica perfil LM3

Prof (cm)	Descripción
Ap 0-22	Horizonte mineral de color negro (10YR 2/1); con una textura franco arcillo limosa con frecuentes fragmentos de roca tamaño gravilla; estructura blocosa sub angular fina a media y de grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros vesiculares finos a medianos y continuos; con frecuentes raíces muy finas a medias, vivas. Un límite neto con topografía plana.
2A 22-40	Horizonte mineral de color negro (7.5YR 2.5/1), con textura arenosa; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros vesiculares, finos a medianos y continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Un límite neto con topografía plana.
3A 40-55	Horizonte mineral de color negro (7.5YR 2.5/1); textura arenosa con abundantes fragmentos de roca tamaño gravilla y cascajo; estructura blocosa sub-angular fina a media con grado débil; consistencia en húmedo muy friable y en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; con frecuentes poros finos y medios, irregulares, continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Un límite neto con topografía plana
3C 55-75	Horizonte mineral de color pardo (7.5YR 4/4), con textura franco arenosa y pocos fragmentos de roca tamaño gravilla; consistencia en húmedo muy friable y en mojado no pegajosa y no plástica; con muchos poros tubulares y continuos; pocas raíces finas, vivas. Tiene un límite neto con topografía plana.
5ABbg 175-187	Horizonte mineral de color pardo intenso (7.5YR 4/6) con moteados amarillo rojizo (5YR 4/6), con textura arenosa franca y pocos fragmentos de roca; con estructura blocosa sub angular muy fina a fina con grado moderado; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pocos poros tubulares, finos y continuos. Un límite neto con topografía plana.
5Bbg 187-197	Horizonte mineral de color pardo (7.5YR 4/4) con moteados pardo muy pálido (10YR 7/3), con textura arenosa franca y pocos fragmentos de roca tamaño gravilla; con estructura blocosa sub angular muy fina a fina con grado moderado; consistencia en húmedo friable y en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros tubulares, finos y continuos. Un límite neto con topografía plana.

5Cg 197-211	Horizonte mineral de color pardo amarillento (10YR 5/4) con moteados rojo amarillento (5YR 5/6), con textura arenosa franca y pocos fragmentos de roca tamaño gravilla; con estructura blocosa sub angular muy fina a fina con grado moderado; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pocos poros tubulares, finos y continuos. Un límite neto con topografía plana.
------------------------------	---

El perfil LM4 es un suelo sepultado que se haya en la base de un lóbulo piroclástico reciente, tiene una sucesión de horizontes R-2ABbg-2CBbg-3Cg; el horizonte 2ABbg tiene 51cm de espesor, posee un color negro con moteados rojos, una textura arcillosa franca y frecuentes raíces vivas y muertas. El horizonte 2CBbg tiene 50cm, es de color pardo con moteados rojo amarillento y textura franco arcillo arenosa, las raíces son frecuentes, finas y muertas.

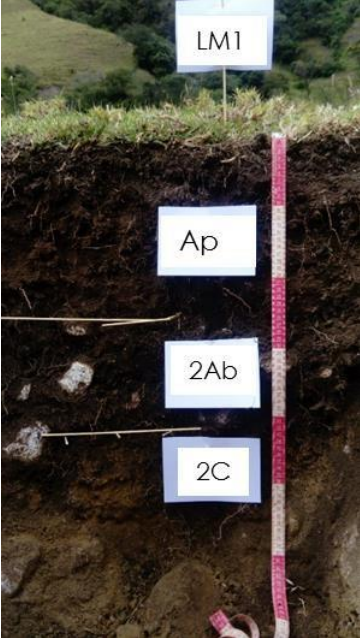
Tabla 2-8: Descripción morfológica perfil LM4

Prof (cm)	Descripción
ABbg 100-151	Horizonte mineral de color negro (5YR 2.5/1) con moteados pardo rojizo (5YR 4/4) en un 30%; con una textura arcillosa franca; estructura blocosa angular fina a media y de grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado pegajosa y plástica; muchos poros tubulares finos a gruesos y continuos; con frecuentes raíces finas, vivas y muertas. Un límite claro con topografía plana.
CBbg 151-201	Horizonte mineral de color pardo (10YR 5/3) y rojo amarillento (5YR 5/6), con textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques sub angulares finos a medios con grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros tubulares, finos a gruesos y continuos; frecuentes raíces finas, muertas. Un límite abrupto con topografía plana.
2Cg 201-x	Horizonte mineral de color amarillo parduzco (10YR 6/8), pardo amarillento (7.5YR 5/8) y pardo oscuro (7.5YR 3/3) en proporciones iguales, y moteados pardo muy pálido 10YR 7/4 en un 10%. Tiene una textura arenosa con abundantes fragmentos de roca tamaño gravilla. Tiene una consistencia en húmedo muy friable y en mojado no pegajosa

y no plástica. Se observan muchos poros irregulares finos a gruesos y continuos; con pocas raíces finas, muertas.

El perfil LM1 (Tabla 2-9) se encuentra ubicado en el plano de un lóbulo piroclástico aterrazado sub-reciente, tiene una sucesión de horizontes Oi-Ap-2Ab-2C; el horizonte mineral superficial tiene 23cm de espesor, un color pardo grisáceo oscuro, textura arcillosa franca con frecuentes fragmentos de gravilla, estructura blocosa angular muy fina a media, moderadamente desarrollados y consistencia friable; el horizonte 2Ab, posee un espesor de 18cm, se distingue del anterior por presentar un color pardo muy oscuro y textura franca con frecuentes fragmentos de gravilla a cascajo; el horizonte 2C tiene un color pardo pálido, textura arcillosa y frecuentes fragmentos de gravilla y piedra.


Tabla 2-9: Descripción morfológica perfil LM1

	
Prof (cm)	Descripción
Oi 0-2	Horizonte orgánico compuesto por fibras poco descompuestas
Ap 2-25	Horizonte mineral de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) con una textura arcillosa franca con frecuentes fragmentos de roca tamaño gravilla; estructura blocosa angular, muy fina a media, con grado moderado; una consistencia en húmedo friable y en mojado no pegajosa y no plástica; frecuentes poros tubulares continuos y muchas raíces medianas, vivas. Un contacto claro con topografía ondulada, Reacción violenta a NaF y H2O2. pH 5.5
2Ab 25-43	Horizonte mineral de color pardo muy oscuro (10YR 2/2) con textura franco arcillosa con frecuentes fragmentos de roca tamaño gravilla y cascajo; estructura blocosa sub-angular, fina a media y grado débil; una consistencia en húmedo friable y en mojado no pegajosa y no plástica; frecuentes poros tubulares, continuos, y muchas raíces finas, vivas. Un contacto claro con topografía plana. Reacción violenta a NaF y H2O2. pH 5.4
2C 43-X	Horizonte mineral de color pardo pálido (10YR 6/3) con textura arcillosa y frecuentes fragmentos de roca tamaño cascajo a piedra; sin estructura,

masiva; una consistencia en húmedo firme y en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros finos tubulares y continuos; frecuentes raíces finas vivas y muertas. Reacción fuerte a NaF y H ₂ O ₂ . pH 5.5
--

El perfil LM2 (Tabla 2-10) contiene una sucesión de horizontes Ap-2Bbg-3Bbg; el primer horizonte tiene 27cm de espesor, tiene un color pardo amarillento oscuro con una textura arcillosa y muchos fragmentos de roca tamaño cascajo; el horizonte 2Bbg es de 29cm, de color pardo intenso con moteados gris rojizo y textura franco arcillosa con frecuentes fragmentos de roca tamaño gravilla; el horizonte 3Bbg se distingue por su color pardo grisáceo muy oscuro, la persistencia de los moteados, y la presencia de fragmentos de roca tamaño bloque.


Tabla 2-10: Descripción morfológica perfil LM2

	
Prof (cm)	Descripción
Ap 0-27	Horizonte mineral de color pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) con una textura arcillosa con muchos fragmentos de roca tamaño cascajo; estructura blocosa angular muy fina y de grado débil; consistencia en húmedo muy friable y en mojado no pegajosa y no plástica; muchos poros irregulares finos y continuos; con frecuentes raíces finas, vivas. Un límite claro con topografía irregular. Reacción ligera a NaF y fuerte a H ₂ O ₂ . pH 5.6
2Bbg 27-56	Horizonte mineral de color pardo intenso (7.5YR 4/6) y moteados gris rojizo (7.5YR 5/2) en un 10%, con textura franco arcillosa con frecuentes fragmentos de roca tamaño gravilla; estructura blocosa sub-angular fina a media y grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado

	ligeramente pegajosa y no plástica; frecuentes poros tubulares e irregulares, finos y continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Un límite difuso con topografía irregular. Reacción fuerte a NaF y H2O2. pH 5.5
3BCbg 56-X	Horizonte mineral de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y moteados pardo amarillento (10YR 5/8) en un 10%; estructura blocosa sub-angular fina a media con grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado pegajosa y ligeramente plástica; con frecuentes poros muy finos, tubulares e irregulares, continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Reacción ligera a NaF y fuerte a H2O2. pH 5

El perfil LM3.2 (**Tabla 2-11: Descripción morfológica perfil LM3.2**Tabla 2-11) presenta una sucesión de horizontes Ap-AB-C; el horizonte superficial Ap tiene un espesor de 27cm, un color pardo rojizo oscuro y una textura franco arcillo arenosa y frecuentes fragmentos de roca tamaño cascajo y laja; el subhorizonte AB, tiene 33cm, un color pardo muy oscuro y textura franco arcillosa arenosa con muchos fragmentos de roca tamaño cascajo y guijarro.

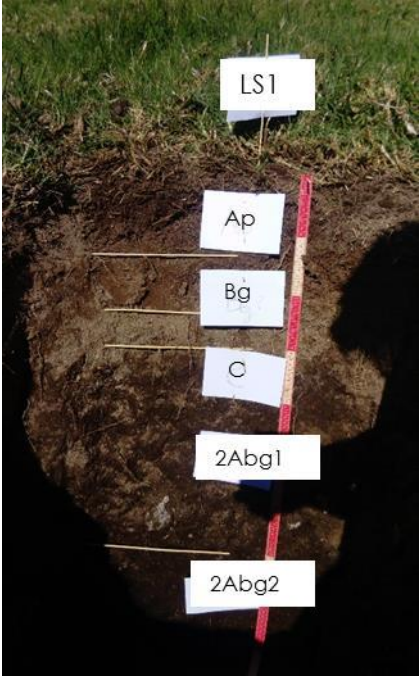
Tabla 2-11: Descripción morfológica perfil LM3.2

	
Prof (cm)	Descripción
Ap 0-27	Horizonte mineral de color pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) con una textura franco arcillo arenosa y frecuentes fragmentos de roca tamaño cascajo y laja: sin estructura, suelta; consistencia en húmedo firme y mojada ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros tubulares finos a medios, continuos; una consistencia en húmedo firme y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica. Límite claro, ondulado.
AB 27-60	Horizonte mineral de color pardo muy oscuro (7.5YR 2.5/2) con textura franco arcillosa arenosa con muchos fragmentos de roca tamaño cascajo y guijarro; sin estructura, masiva; consistencia en húmedo firme y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros irregulares, finos a medios y continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Un

	límite difuso con topografía irregular. Reacción fuerte a NaF y H ₂ O ₂ . pH 5.5
C 60-X	Horizonte mineral de color pardo (7.5YR 5/3); sin estructura, masiva; consistencia en húmedo muy firme y en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; con muchos poros finos a medios, irregulares, continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Reacción ligera a violenta y ligera a H ₂ O ₂ . pH 5.4

El perfil LS1 (Tabla 2-12) tiene una sucesión de horizontes Ap-Bg-C-2Abg1-2Abg2; el horizonte superficial Ap, tiene un espesor de 12cm, un color pardo rojizo oscuro con moteados pardo rojizo y una textura franco arcillo arenosa; el horizonte Bg es de 12cm, tiene un color pardo amarillento oscuro y moteados tenues, su textura es arenosa franca; el horizonte C tiene 8cm, un color pardo amarillento y moteados ligeramente más oscuros y textura arenosa. El perfil sepultado tiene un horizonte 2Abg1, de 38cm, color negro y moteados pardos amarillentos, el siguiente horizonte 2Abg2, es de color negro.

Tabla 2-12: Descripción morfológica perfil LS1

	
Prof (cm)	Descripción
Ap 0-12	Horizonte mineral de color pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) con moteados pardo rojizo (5YR 4/6) en un 10%, con una textura franco arcillo arenosa; estructura blocosa sub-angular muy fina y de grado modearado; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros tubulares finos muy finos y continuos; con muchas raíces finas y medias, vivas. Un límite claro con topografía plana.
Bg 12-24	Horizonte mineral de color pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) y moteados pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en un 5%, con textura

	arenosa franca; estructura blocosa sub-angular fina a media y grado moderado; consistencia en húmedo firme y en mojado pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros tubulares, muy finos y continuos; frecuentes raíces finas, vivas. Un límite abrupto con topografía plana.
C 24-32	Horizonte mineral de color pardo amarillento (10YR 5/4) y moteados pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en un 5%; textura arenosa, estructura blocosa sub-angular fina a media con grado débil; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; con muchos poros finos, irregulares, continuos; muchas raíces finas, vivas. Un límite gradual con topografía irregular.

B. Anexo: Valoración de propiedades morfológicas y físico-químicas

Tabla 2-13: Cálculo del índice de desarrollo PDI (color) para cada horizonte

Muestra	Espesor	Matriz	%	Vb-w	Vb-w(n)	Vmel	Vmel (n)	PDI Vmel	darkening	darkening (t	Vrubi	Moteado	%	C1		
LS1 Ap		12 5YR 3/4		0,9	216	0,21	18	5,08235294	60,9882353	0,92	0,06	216	5YR 4/6	0,1	4,2	0,55
LS1 Bg		12 10YR 3/4		0,95	136,8	0,13	19	0,44705882	5,36470588			228	10YR 4/6	0,05	4,1	0,54
LS1 C		8 10YR 5/4		0,95	91,2	0,09	0	0	0				10YR 4/6	0,05	4,1	0,54
LS1 2ABg1		38 10YR 2/2		0,95	216,6	0,21	28,5	0,67058824	25,4823529	7,60	0,46	722	5YR 4/6	0,05	2,2	0,29
LS1 2ABg2		30 10YR 2/2		1	180	0,18	30	0,70588235	21,1764706	6,00	0,36	600		0	2	0,26
LM1 Ap		23 10YR 3/2		0,95	131,1	0,13	28,5	0,67058824	15,4235294	3,29	0,20		7.5YR 4/6	0,05	2,2	0,29
LM1 2AB		18 10YR 2/2		1	108	0,11	40	0,94117647	16,9411765					0	2	0,26
LM1 2C		57 10YR 6/3		0,95	487,35	0,48	0	0	0				5YR 5/8	0,05	3,25	0,43
LM2 Ap		27 10YR 3/4		1	324	0,32	30	0,70588235	19,0588235	2,08	0,12	540		0	4	0,53
LM2 2Bg		29 7.5YR 4/6		0,9	626,4	0,61	18	0,42352941	12,2823529			1305	7.5YR 5/2	0,1	5,6	0,74
LM2 3BCbg		44 10YR 3/2		0,95	250,8	0,25	28,5	0,67058824	29,5058824				10YR 5/8	0,05	2,3	0,30
LM3.2 Ap		27 5YR 3/2		0,95	256,5	0,25	19	0,44705882	12,0705882	3,86	0,23		5YR 4/6	0,05	2,2	0,29
LM3.2 AB		33 7.5YR 2.5/2		1	264	0,26	35	0,82352941	27,1764706	5,50	0,33			0	2	0,26
LM3.2 C		40 7.5YR 5/3		1	480	0,47	0	0	0					0	2	0,26
LM4 ABb		51 5YR 2.5/1		0,7	54,5	0,05	31,5	0,74117647	37,8	14,57	0,87		5YR 4/4	0,3	1,9	0,25
LM4 Bbg		50 10YR 5/3		0,8	360	0,35	8	0,18823529	9,41176471				5YR 5/6	0,2	3,6	0,47
LM4 2Cg		50 10YR 6/8, 7.		0,9	1020	1,00	0	0	0				10YR 7/4	0,1	7,6	1,00
LS2Ap		32 10YR 2/1		0,85	81,6	0,08	42,5	1	32	10,67	0,64		7.5YR 5/6	0,5	3,85	0,51
LS2 C		68 10YR 7/6		0,15	70,7	0,07	0	0	0				10YR 5/6	0,5	3,9	0,51
LS2 2Ab1		18 10YR 2/2		0,95	102,6	0,10	19	0,44705882	8,04705882	3,60	0,22		7.5YR 4/6	0,05	2,2	0,29
LS2 2Ab2		50 10YR 2/1		0,5	150	0,15	10	0,23529412	11,7647059	16,67	1,00		10YR 5/6	0,5	3,5	0,46
LS2 2BC		26 10YR 4/4		0,7	218,4	0,21	0	0	0				10YR 4/6	0,05	3,1	0,41
PCLM3 A		38 10YR 3/3		1	342	0,34	20	0,47058824	17,8823529	3,80	0,23				3	0,39
PCLM3 2Ab		10 10YR 2/2		1	60	0,06	30	0,70588235	7,05882353	2,00	0,12				2	0,26
PCLM3 2C		51 10YR 5/4		1	612	0,60	0	0	0						4	0,53

Tabla 2-14. Cálculo del índice de desarrollo PDI (textura y consistencia) para cada horizonte

Muestra	Espesor	TEXT	PEG	PL	Vt	Vt(n)	PDI Vt
LS1 Ap	12	FArA	LP	LP	30	0,75	9,00
LS1 Bg	12	AF	P	LP	30	0,75	9,00
LS1 C	8	A	LP	LP	0	0	0,00
LS1 2ABg1	38	FArA	LP	LP	20	0,5	19,00
LS1 2ABg2	30	FArA	LP	LP	20	0,5	15,00
LM1 Ap	23	ArFg	N	N	20	0,5	11,50
LM1 2AB	18	FArg	N	N	0	0	0,00
LM1 2C	57	Ar	N	N	0	0	0,00
LM2 Ap	27	Ag	N	N	20	0,5	13,50
LM2 2Bg	29	FAg	LP	NP	20	0,5	14,50
LM2 3BCbg	44	FArAg	P	LP	10	0,25	11,00
LM3.2 Ap	27	FArAg	LP	LP	10	0,25	6,75
LM3.2 AB	33	FArAg	LP	LP	10	0,25	8,25
LM3.2 C	40	FArAg	LP	N	0	0	0,00
LM4 ABb	51	ArF	P	P	40	1	51,00
LM4 Bbg	50	FArA	LP	LP	20	0,5	25,00
LM4 2Cg	50	Ag	N	N	0	0	0,00
LS2Ap	32	Ag	N	N	0	0	0,00
LS2 C	68	GA	N	N	0	0	0,00
LS2 2Ab1	18	FArA	LP	LP	10	0,25	4,50
LS2 2Ab2	50	FArAg	LP	LP	10	0,25	12,50
LS2 2BC	26	Fg	LP	LP	0	0	0,00
PCLM3 A	38	Ag	LP	N	10	0,25	9,50
PCLM3 2Ab	10	Ag	LP	N	10	0,25	2,50
PCLM3 2C	51	Ag	N	N	0	0	0,00

Tabla 2-15. Cálculo del índice de desarrollo PDI (estructura) para cada horizonte

Muestra	Espesor	EST_T	EST_G	Ve	Ve (n)	PDI Ve
LS1 Ap	12	10	M	20	0,67	8,00
LS1 Bg	12	10	M	20	0,67	8,00
LS1 C	8	10	D	10	0,33	2,67
LS1 2ABg1	38	10	M	20	0,67	25,33
LS1 2ABg2	30	10	M	20	0,67	20,00
LM1 Ap	23	10	M	20	0,67	15,33
LM1 2AB	18	10	D	10	0,33	6,00
LM1 2C	57	0		0	0,00	0,00
LM2 Ap	27	20	D	20	0,67	18,00
LM2 2Bg	29	10	M	10	0,33	9,67
LM2 3BCbg	44	10	M	10	0,33	14,67
LM3.2 Ap	27	10	M	30	1,00	27,00
LM3.2 AB	33	10	M	30	1,00	33,00
LM3.2 C	40	0		0	0,00	0,00
LM4 ABb	51	10	M	10	0,33	17,00
LM4 Bbg	50	10	M	10	0,33	16,67
LM4 2Cg	50	0		0	0,00	0,00
LS2Ap	32	10	D	20	0,67	21,33
LS2 C	68	0		0	0,00	0,00
LS2 2Ab1	18	10	D	10	0,33	6,00
LS2 2Ab2	50	10	M	30	1,00	50,00
LS2 2BC	26	10	M	30	1,00	26,00
PCLM3 A	38	10	D	20	0,67	25,33
PCLM3 2Ab	10	10	D	20	0,67	6,67

Tabla 2-16. Cálculo del índice de desarrollo PDI (total) y normalizado.

Muestra	PDI Vmel	PDI Vt	PDI Ve	PDI	PDIA	PDIH
LS1 Ap	61,0	9,00	8,00	26,00	0,16	
LS1 Bg	5,4	9,00	8,00	7,45		
LS1 C	0,0	0,00	2,67	0,89		34,34
LS1 2ABg1	25,5	19,00	25,33	23,27	0,52	
LS1 2ABg2	21,2	15,00	20,00	18,73	0,42	42,00
LM1 Ap	15,4	11,50	15,33	14,09	0,31	
LM1 2AB	16,9	0,00	6,00	7,65		
LM1 2C	0,0	0,00	0,00	0,00		21,73
LM2 Ap	19,1	13,50	18,00	16,85	0,38	
LM2 2Bg	12,3	14,50	9,67	12,15		29,00
LM2 3BCbg	29,5	11,00	14,67	18,39	0,43	18,39
LM3.2 Ap	12,1	6,75	27,00	15,27	0,33	
LM3.2 AB	27,2	8,25	33,00	22,81		
LM3.2 C	0,0	0,00	0,00	0,00		38,08
LM4 ABb	37,8	51,00	17,00	35,27	0,78	
LM4 Bbg	9,4	25,00	16,67	17,03		
LM4 2Cg	0,0	0,00	0,00	0,00		52,29
LS2Ap	32,0	0,00	21,33	17,78	0,42	
LS2 C	0,0	0,00	0,00	0,00		17,78
LS2 2Ab1	8,0	4,50	6,00	6,18	0,14	
LS2 2Ab2	11,8	12,50	50,00	24,75	0,52	
LS2 2BC	0,0	0,00	26,00	8,67		39,60
PCLM3 A	17,9	9,50	25,33	17,57	0,39	
PCLM3 2Ab	7,1	2,50	6,67	5,41	0,12	
PCLM3 2C	0,0	0,00	0,00	0,00		22,98

Tabla 2-17. Cálculo del índice de desarrollo IPA para propiedades químicas

Muestra	Espesor	C(n)	IPA -C	Prop Ándicas	PA(n)	IPA-PA	RETENCIÓN FOSFÓRICA %		IPA -RP	Almo/Alamorfo	IPA(q)
LS1 Ap	12	0,50	6,05	0,43	0,11	1,3	39,1	0,398	4,78	0,72	4,0
LS1 Bg	12	0,11	1,30	0,59	0,15	1,8	48,9	0,499	5,98	0,63	3,0
LS1 2ABg1	38	0,22	8,48	1,66	0,42	15,8	93,1	0,950	36,09	0,40	20,1
LS1 2ABg2	30	0,20	5,91	1,45	0,36	10,9	83,6	0,853	25,59	0,37	14,1
LM1Ap	28	0,20	5,53	0,57	0,14	4,0	50,8	0,518	14,50	0,69	8,0
LM1 2Ab	18	0,21	3,73	0,88	0,22	4,0	57,5	0,587	10,57	0,65	6,1
LM2 Ap	27	0,32	8,73	0,44	0,11	3,0	38,1	0,389	10,50	0,50	7,4
LM2 2Bg	19	0,09	1,79	0,46	0,11	2,2	35,2	0,359	6,82	0,63	3,6
LM2 3BCbg	30	0,16	4,82	0,39	0,10	2,9	38,8	0,396	11,88	0,40	6,5
LM3 Ap	27	0,24	6,61	0,60	0,15	4,1	56,5	0,576	15,56	0,76	8,7
LM3 AB	33	0,20	6,74	0,59	0,15	4,8	63,9	0,651	21,50	0,68	11,0
LM4ABb	51	0,17	8,67	2,08	0,52	26,6	87,5	0,892	45,52	0,34	26,9
LM4 Bbg	50	0,03	1,46	2,54	0,64	31,9	92,8	0,946	47,31	0,06	26,9
LS2 Ap	32	1,00	32,00	1,49	0,37	11,9	88,3	0,901	28,83	0,82	24,3
LS2 2Ab1	18	0,15	2,65	3,60	0,90	16,3	98,0	1,000	18,00	0,09	12,3
LS2 2Ab2	50	0,03	1,71	3,99	1,00	50,0	98,0	1,000	50,00	0,23	33,9
PCLM3 A	38	0,31	11,77	0,99	0,25	9,4	73,1	0,746	28,34	0,49	16,5
PCLM3 2Ab	10	0,42	4,18	1,20	0,30	3,0	85,2	0,869	8,69	0,50	5,3

Tabla 2-18: Pesos por evidencia para unidades geológicas

Simbolo	Wi+	Wi-	Wf
Pre-montoso	- 0,32686566	0,09742757	- 0,22943809
rm-i	#jNUM!	0,01168524	#jNUM!
lm-s	1,11143899	-0,0063646	1,10507439
lm-s	1,21923556	- 0,00326553	1,21597004

si-m	#jNUM!	5,6613E-05	#jNUM!
lm-m	#jNUM!	0,04141114	#jNUM!
lms	- 0,04515822	0,01745042	-0,0277078
lm-s	- 4,89423075	0,0123242	- 4,88190655
lm-s	0,63379939	-0,0734323	0,56036709
lm-i	1,36500368	- 0,10717042	1,25783326
si-m	- 0,23855764	0,00292396	- 0,23563368
al	#jNUM!	0,00944992	#jNUM!
hl	0,28197106	- 0,00798776	0,2739833
hl	#jNUM!	6,6601E-07	#jNUM!
mt-i	1,15154116	-0,0687574	1,08278376
lm-s	#jNUM!	0,00061292	#jNUM!
si-m	0,24336162	- 0,02140345	0,22195816
lms	#jNUM!	0,01049662	#jNUM!
lm-s	#jNUM!	0,00054361	#jNUM!
lms	#jNUM!	0,06455184	#jNUM!
lm-i	#jNUM!	0,00704384	#jNUM!
hl	#jNUM!	0,0099839	#jNUM!

cql	- 0,19626818	0,00457384	- 0,19169435
lms	#¡NUM!	0,00549501	#¡NUM!

Tabla 2-19: Pesos por evidencia para curvatura del relieve

Value	Wi+	Wi-	Wf
1	0,04804572	- 0,05165529	- 0,00360957
-1	-0,0516551	0,04804554	- 0,00360957

Tabla 2-20: Pesos por evidencia para distancia a drenajes

Distancia en metros	Wi+	Wi-	Wf
10	- 0,17929415	0,03951082	- 0,13978332
20	-0,2745447	0,04600621	- 0,22853849
30	0,09370836	-0,0172501	0,07645826
40	0,21614633	- 0,03559996	0,18054637
50	- 0,12707423	0,0135604	- 0,11351383
60	- 0,21364266	0,0163828	- 0,19725985

70	0,10421125	- 0,00689964	0,09731161
80	0,02469936	- 0,00115491	0,02354445
90	- 0,17452802	0,00527667	- 0,16925136
100	0,32377979	- 0,00889058	0,31488921
110	0,95766175	- 0,02099112	0,93667063
120	1,18554359	- 0,01438404	1,17115956
130	0,84317191	- 0,00419107	0,83898084
140	1,49978788	- 0,00514289	1,49464498