

INFORME DEL JURADO NOMBRADO POR EL CONSEJO DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
PARA CONSIDERAR EL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO DEL
BACHILLER

BRITO GRANADOS, SABRINA


En Mérida a los 25 días del mes de julio del año 2013, a las 03:00 p.m. se reunieron los Profesores: Lina Sarmiento (tutora), Daniel Machado, Luis Daniel Llambi, de la Facultad de Ciencias, miembros del jurado nombrado por el Consejo de la Facultad de Ciencias, para revisar el Trabajo Especial de Grado: "*Indicadores del cambio en la Calidad del Suelo en un Gradiente de Degradación en el Valle alto del Rio Chama (Páramo venezolano)*", que presentó el Bachiller: Brito Granados, Sabrina, titular de la Cédula de Identidad N° V017664998, para optar al título de:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA


en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Acto seguido se procedió a oír la exposición que sobre el tema arriba mencionado realizó el Bachiller: Brito Granados, Sabrina.

Después del correspondiente interrogatorio, el Jurado procedió a deliberar sobre la calificación del trabajo sometido a su consideración.

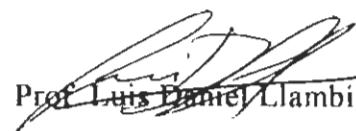
Finalmente el Jurado lo declaró APROBADO con la Calificación de VEINTE (20) PUNTOS. Y recomendado para su publicación.



Prof. Lina Sarmiento
Tutora



Prof. Daniel Machado



Prof. Luis Daniel Llambi

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

Núcleo "Petro Brincón Gutiérrez", Edificio "A", Facultad de Ciencias, Mérida 5101 - República Bolivariana de Venezuela
Teléfono: (58 - 274) 240 1291 / 240 1292 Fax: 240 1293 Web: www.cci.una.edu.ve Correo: ccibio@ciencias.una.edu.ve



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN BIOLOGÍA.
**Indicadores del cambio en la Calidad del Suelo en un Gradiente de Degradación en el
Valle alto del Río Chama (Páramo venezolano)**

Tesista: Sabrina Brito Granados
Tutor: Lina Sarmiento Monasterio
Cotutor: Enrique García Amor

Julio 2013
Mérida, Venezuela

Este trabajo recibió financiamiento del

CHCHT – ULA

(Proyecto FA-519-12-01-C).

Agradecimientos

A mis perros por acompañarme en el largo camino de la vida y permanecer entre mis mejores recuerdos después de su partida... Binka, Apolo y Chia

A mis padres por su amor incondicional y eterna paciencia; a Yamile por estar presente en todos los momentos importantes de mi vida, buenos y malos

A mi tutora Lina y a Enrique García por su constante apoyo y amistad brindada, por inspirarme a hacer un trabajo tan lindo y mostrarme lo hermoso que son los suelos de los páramos andinos

A los profesores de ICAE con los que he compartido como con una familia, en las materias de la opción, en la preparaduría y durante este trabajo, Llambí, Julia, Licia, Eulogio, Dimas, Daniel Machado, Anairamiz, Maya...

Al personal técnico que tanto me ayudó en el campo y en el laboratorio, a Zulay, Jhonny, Williams, Francis, Nancy, Idalba

A otros profesores que marcaron mi formación como bióloga, Benito, Elis Aldana, Luis Daniel Otero, Segnini, Pascual, Gustavo Fermín, Malena.

A los amigos que me acompañaron por una cerveza a Cibeles, me ayudaron en el laboratorio y me apoyaron en todo... Julito, Javier, Tomate, Lirey, Adrian

A mis amigas en la distancia, no por eso dejan de estar presentes para mí... Claudia, Rossa, Belinda, Melisa, Maria Laura, Raquel

A mis amigos de bici y montaña que me han acompañado por hermosos lugares... Samantha, Juan Carlos, Iván, Oscar, Mariita, Yermana, Jaseh, José Ramón, Diego²...

Y a las hermosas montañas merideñas, fuente de inspiración, lugar de meditación...

Muchas gracias.

Resumen

La agricultura se practica en el páramo venezolano desde épocas pre-coloniales pero es con la llegada de los españoles que se inicia el cultivo de trigo, el cual promovió fuertes procesos de degradación de estas frágiles laderas. Actualmente se realiza una agricultura intensiva que utiliza enmiendas orgánicas para la producción de papas, ajo y zanahoria principalmente. Partiendo de esto, se estudiaron indicadores de calidad edáfica, para evaluar los procesos de transformación sucedidos. El trabajo se realizó en el Valle alto del Río Chama, Edo. Mérida, una zona de importante producción triguera en el pasado y actualmente de agricultura intensiva pero con amplias áreas degradadas por el ciclo triguero. Se estudiaron suelos con diferentes historias de manejo: páramo natural (PN), suelo con manejo agrícola intensivo (SA), suelo de ladera degradada por el trigo, sin cultivar (LD) y de ladera degradada retomada con agricultura (LR), con réplicas de cada tipo de suelo en cuatro sectores del valle (n=16). En cada suelo se evaluaron diversas propiedades físicas, químicas y biológicas para un total de 42 propiedades edáficas, incluyendo un ensayo de producción vegetal en bolsas de vivero donde se sembró maíz para evaluar la fertilidad. Las diferencias entre los tipos de suelo se analizaron variable por variable, utilizando permanovas y de forma integrada a través de un análisis de componentes principales. Ambos análisis permitieron separar los cuatro tipos de suelo e identificar las variables sensibles. En forma general las propiedades físicas respondieron menos que las químicas y éstas últimas, menos que las biológicas, las cuales fueron muy sensibles, especialmente al manejo agrícola. El suelo de páramo se caracteriza por presentar los valores más altos de MOS, N, CIC, puntos de retención hídrica y arcilla, mientras que los suelos degradados perdieron cantidades significativas de arcilla y MOS, presentan las densidades más altas (más compactación) y relación C/N más alta que refleja la baja calidad de la MOS presente. Por otro lado, los suelos cultivados actualmente (SA y LR) mostraron un incremento en la concentración de nutrientes (P, N mineral, K⁺, Na, Mg, Ca), mayor actividad microbiana (respiración y poblaciones de bacterias), valores de pH, conductividad eléctrica y hidráulica más altos; además de alcanzar mayor biomasa de maíz; reflejando mejor fertilidad inducida por las adiciones de fertilizantes minerales y abonos orgánicos. Tanto los suelos agrícolas como las laderas retomadas presentan pérdidas importantes de arcillas, lo cual refleja la erosión causada por el arado y probablemente estimulada por el riego. Sin embargo, en SA los contenidos de MOS y otras propiedades edáficas fueron mayores que en las LR, mostrando que estas últimas aun conservan la impronta de la degradación triguera. Luego se propuso la construcción de diversos índices que permitieran reducir el gran número de variables analizadas, algunas altamente correlacionadas entre sí, a unas pocas que reflejaran los aspectos esenciales del funcionamiento del suelo. Para esto se hizo una tabla de correlaciones y un análisis de clasificación para visualizar la redundancia en la matriz de datos e identificar variables que se comportan de forma similar. En base a todo esto se propusieron tres índices diferentes que pueden ser útiles en la zona de estudio. El primero, es un índice de degradación basado en cinco propiedades edáficas. Al aplicarlo a los suelos estudiados, ubica por encima las laderas degradadas, luego coloca las laderas retomadas, seguidas de los suelos cultivados con agricultura intensiva y finalmente con menor degradación coloca los páramos naturales. Los otros dos son índices de calidad; uno analiza específicamente la fertilidad del suelo, partiendo de la cantidad de biomasa de maíz que es capaz de producir y el otro que estudia la calidad edáfica integrando varias funciones del suelo mediante dos enfoques diferentes; el primero, considera la calidad ambiental incluyendo funciones como la retención de agua y nutrientes y resistencia a la degradación, que colocó páramos naturales por encima, luego suelos de agricultura intensiva, laderas degradadas y finalmente con menor calidad ambiental, laderas retomadas. El segundo modelo consideró una función extra que evalúa las condiciones óptimas para el desarrollo vegetal, obteniendo una sobreestimación de los suelos cultivados, sobre los no manejados; ubicando la agricultura intensiva con mayor calidad que el páramo natural y laderas retomadas mayores que las degradadas; estos resultados reflejan un mejoramiento de los suelos degradados una vez retomados con prácticas del sistema agrícola intensivo actual. Concluimos que los suelos del valle alto del Río Chama reflejan de forma bastante clara la historia de manejo y disturbio a que han sido sometidos, donde los suelos agrícolas no muestran grandes signos de degradación gracias a las aplicaciones de enmiendas orgánicas que reciben, mientras que los suelos degradados mostraron un empobrecimiento significativo que parece ser debido a las pérdidas de MOS y arcillas, generando condiciones de compactación y menor retención de agua y nutrientes. Con la retoma de las laderas degradadas, la calidad del suelo no parece recuperarse completamente; sin embargo, se observó un mejoramiento en el funcionamiento de este compartimiento, con una mayor productividad de maíz en estos suelos.

Palabras claves: páramo, montañas, Andes, degradación, índices de calidad edáfica, agricultura intensiva, sistema triguero

Tabla de Contenido.

1	INTRODUCCIÓN	13
1.1	MARCO TEÓRICO	13
1.1.1	El Suelo	13
1.1.2	Efecto de las transformaciones sobre el sistema suelo.....	14
1.1.3	Indicadores de cambios en la calidad del suelo	15
1.1.4	Índices de Calidad del Suelo	16
1.1.5	Historia de uso de los suelos en el valle alto del Chama	20
1.2	ANTECEDENTES.....	22
1.3	HIPÓTESIS DE TRABAJO	25
1.4	OBJETIVOS	26
1.4.1	General.....	26
1.4.2	Específicos	26
2	METODOLOGÍA	28
2.1	ÁREA DE ESTUDIO	28
2.2	DISEÑO DE MUESTREO.....	29
2.2.1	Tratamientos o Historias de Uso	30
2.2.2	Preselección de los suelos muestreados	31
2.2.3	Salida de reconocimiento.....	35
2.2.4	Áreas y parcelas seleccionadas	35
2.3	MUESTREO DE LOS SUELOS	37
2.3.1	Caracterización de las parcelas de muestreo.....	37
2.3.2	Recolección de las muestras de suelo	38
2.4	PROCESAMIENTO DE LOS SUELOS EN EL LABORATORIO	38
2.4.1	Distribución de la muestra de suelo	38
2.4.2	Preparación previa de los suelos	39
2.4.3	Atributos determinados.....	40
2.4.3.1	Métodos de Determinación de las Propiedades Físicas	42
2.4.3.2	Métodos de medición de las propiedades químicas	45
2.4.3.3	Métodos de medición de las propiedades biológicas.....	48
2.5	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	53
2.5.1	Eliminación de datos anómalos.....	53

2.5.2	Análisis estadístico.....	54
2.6	CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE PARA EVALUAR EL ESTADO DEL SUELO	54
2.6.1	Índice de Fertilidad del Suelo (IFS)	55
2.6.2	Índice de Degradación del Suelo (IDS).....	55
2.6.3	Índice integrado de la Calidad del Suelo (ICS).....	56
2.6.4	Análisis Estadístico de los resultados del Índice.....	57
3	RESULTADOS.....	58
3.1	EL FUNCIONAMIENTO DEL SUELO	58
3.1.1	Comportamiento anómalo de Mocao.	58
3.1.2	Análisis de Varianza	59
3.1.3	Análisis Multivariado	64
3.2	CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO	69
3.2.1	Análisis de las variables.....	69
3.2.1.1	Correlaciones entre variables.....	69
3.2.1.2	Clasificación de la Variables.....	73
3.2.2	Índice de Fertilidad del Suelo	75
3.2.3	Índice de Degradación del Suelo:	76
3.2.4	Índice Integrado de Calidad del Suelo	78
3.2.4.1	Asignación de Funciones del suelo y sus respectivos indicadores ..	78
3.2.4.2	Estandarización de los Indicadores Seleccionados	82
3.2.4.3	Planteamiento de dos Modelos de Índice de Calidad edáfica	85
3.2.4.4	Resultados del Índice de calidad del suelo	85
3.2.4.5	Relaciones entre dos sets de indicadores	87
4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	89
4.1	LOS PÁRAMOS NATURALES COMO LÍNEA BASE DE LAS TRANSFORMACIONES	89
4.2	EFFECTO DE LA AGRICULTURA INTENSIVA ACTUAL.....	91
4.3	EFFECTO DE LA DEGRADACIÓN POR EL CICLO TRIGUERO	96
4.4	EFFECTO DE LA RETOMA DE SUELOS DEGRADADOS POR AGRICULTURA INTENSIVA. 100	
4.5	DISCUSIÓN DEL DISEÑO DE MUESTREO.....	103
4.5.1	La Heterogeneidad ambiental típica de ecosistemas de Alta montaña tropical.....	103
4.5.2	Número de réplicas.....	104
4.5.3	La historia de uso de cada suelo.....	104
4.5.4	Beneficios y alcances del Diseño de Muestro	105

4.6	ANÁLISIS DEL ENFOQUE DE INDICADORES Y DEL ÍNDICE DE CALIDAD EDÁFICA	105
4.6.1	Complejidad de la construcción de un índice para evaluar el estado del suelo.....	105
4.6.2	Índice de Fertilidad del Suelo (IFS)	106
4.6.3	Índice de Degradación del Suelo (IDS)	106
4.6.4	Índice integrado de Calidad del Suelo (ICS)	108
4.6.4.1	Selección de Funciones e Indicadores para el índice	108
4.6.4.2	Propuesta de los dos Modelos de índice	109
4.6.4.3	Análisis de Correlaciones entre sets de indicadores	111
5	CONCLUSIONES Y SÍNTESIS FINAL	112
5.1	¿QUÉ CAMBIOS HAN OCURRIDO EN EL SUELO DEL PÁRAMO ANDINO COMO CONSECUENCIA DE LA DEGRADACIÓN CAUSADA POR EL SISTEMA TRIGUERO?	112
5.2	¿QUÉ PROPIEDADES EDÁFICAS DEBEN RECUPERARSE PARA RESTAURAR LOS SUELOS DEGRADADOS?	112
5.3	¿QUÉ EFECTO TIENE EL SISTEMA AGRÍCOLA ACTUAL SOBRE EL SUELO CONSIDERANDO LA SUSTENTABILIDAD DEL SISTEMA?	113
5.4	¿ES LA RETOMA DE LAS LADERAS DEGRADADAS POR LA AGRICULTURA, UNA POSIBLE ESTRATEGIA PARA RECUPERAR LOS SUELOS AGOTADOS POR EL CICLO TRIGUERO?	113
6	BIBLIOGRAFÍA	114

Índice de Figuras

Figura 1.1. Mapa de Mérida. Resaltados con puntos blancos, los centros de producción triguera durante la época de la colonia (Tomado de J.K. Smith).....	21
Figura 2.1. Mapa topográfico del valle alto del Chama, resaltando la localización de la ciudad de Mucuchíes, capital de municipio y las zonas de muestreo (Mocao, La Campana, Mitibibó y Los Apios). Mérida – Venezuela.....	28
Figura 2.2. Esquema del diseño de muestreo, con cuatro historias de manejo (tratamientos) replicadas en cuatro sectores del valle alto del río Chama, para un total de 16 parcelas. Una unidad de muestreo de 10x10 m se ubicó en cada una de las parcelas.....	30
Figura 2.3. Foto panorámica de la localidad Los Apios. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.	32
Figura 2.4. Foto panorámica de la localidad Los Apios. Año: 2011. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.	32
Figura 2.5. Foto panorámica de la localidad La Campana. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.	33
Figura 2.6. Localidad la campana. Año: 2009. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.	33
Figura 2.7. Localidad Mocao. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.	34
Figura 2.8. Localidad Mocao. Año: 2011. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.....	34
Figura 2.9. Localidad Mitibibó. Año: 2012. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y su pendiente respectiva.....	35
Figura 2.10. Mapa topográfico del área de estudio mostrando la ubicación de las parcelas seleccionadas en cada localidad para el muestreo de los suelos, los tonos de verde indican diferentes niveles altitudinales. Cuenca alta del río chama, Mérida - Venezuela.....	37
FIGURA 2.11. Ficha de campo empleada (tomada y modificada de Guitian y Carballas, 1976).....	37
Figura 2.12. Recolección de muestras de suelo no alterado utilizando cilindros metálicos.	38
Figura 2.13. Esquema que indica la repartición de la muestra de suelo proveniente del campo para la determinación de las diferentes pruebas en el laboratorio, se indican los procedimientos de preparación del suelo previo al laboratorio, así como la cantidad de suelo apartado para cada determinación.....	39
Figura 2.14. Documentación fotográfica de los suelos homogeneizados, tamizados a 2 mm y secados al aire. Nótese la diferencia de color entre los tratamientos: (a) localidad Mitibibó, (b) localidad Los Apios, (c) localidad La Campana y (d) localidad Mocao.	40
Figura 2.15. (a) Licuadora para dispersar suelo “soil dispersión mixer” (b) hidrómetro digital (Gilson company inc. model N°SA-1) (c) cilindros de 1 l con la muestra de suelo.....	42
Figura 2.16. (a) Muestras de suelo intactas en los cilindros, puestos a saturar con agua por ascenso capilar y (b) Estufa utilizada para secar el suelo a 105 °C.	43
Figura 2.17. Dispositivo utilizado para la prueba de conductividad hidráulica, el cual incluye una estructura de madera con los cilindros apoyados sobre embudos, sobre los cilindros se pegaron vasos para mantener el volumen de agua y se utilizaron envases plásticos para la colecta del agua percolada.	44

Figura 2.18. (a) Crisoles de porcelana para colocar las muestras de suelo, (b) Mufla, para la ignición de la materia orgánica.	45
Figura 2.19. (a) Destilador manual; (B) Titulador.	47
Figura 2.20. (a) Agitador (b) Destilador automático (c) Titulador.....	48
Figura 2.21. (a) cámara de incubación, (b) Envases con la muestra de suelo, (c) Trampas de hidróxido de sodio.	49
Figura 2.22. Réplicas realizadas en las pruebas de microbiología. Los puntos negros son los pozos de las microplacas de titulación, los recuadros grises son las réplicas hechas para cada submuestra...	50
Figura 2.23. Microplacas de titulación para la determinación de los grupos microbiológicos (bacterias heterotrofas, oligotrofos, copiotrofos y proteolíticos).....	51
Figura 2.24. Tubos de ensayo con cultivo de microorganismos celulolíticos donde se utiliza como fuente de celulosa una tira de papel de filtro.	52
Figura 2.25. Documentación fotográfica del ensayo de fertilidad, se muestran las diferentes replicas de cada tratamiento en las cuatro localidades al momento de la cosecha, cuando las plantas tenían un mes de sembradas. (a) Mitibibó, (b) Los Apios, (c) La Campana y (d) Mocao.	53
Figura 2.26. Ejemplo de la estandarización de un indicador (mos) mediante una regresión lineal para el índice de degradación del suelo. El valor 0 se asigna al valor mínimo obtenido del indicador en las 16 parcelas menos 10% y el valor 1 al máximo valor + 10%.	55
Figura 2.27. Funciones edáficas consideradas para la construcción del Índice de Calidad del Suelo, considerando dos niveles de interpretación y especificidad.....	56
Figura 3.1. Foto aérea de la localidad Mocao del año 1952, donde se resalta la parcela seleccionada como páramo natural, y se observa la presencia de una era para trillar, lo que sugiere fuertemente que fue cultivada con trigo.....	59
Figura 3.2. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando todas las variables determinadas. Se presenta el plano formado por los ejes 1 y 2. Se indica la varianza explicada por cada eje y se muestra el círculo de correlación que permite inferir qué variables tuvieron una correlación significativa con cada eje ($r \geq 0,4973$, $P=0,05$, $n=16$). Ver abreviaciones de las variables y los sitios en la Figura 3.3.	64
Figura 3.3. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando todas las variables determinadas, con los ejes 1 y 3 y la varianza explicada por cada uno. Círculo de correlación... ..	65
Figura 3.4. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando únicamente las variables físicas del suelo, se muestran los ejes 1, 2 y 3 y la varianza explicada por cada uno.	67
Figura 3.5. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables químicas del suelo, se muestran los ejes 1, 2 y 3 y la varianza explicada por cada uno.	68
Figura 3.6. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables biológicas del suelo, se muestran los ejes 1, 2 y 3 y la varianza explicada por cada uno.....	68
Figura 3.7. Clasificación de las variables. Se utilizó la distancia euclidiana y el método de agrupación fue Wards. Se muestra con la línea roja el nivel en el que se hizo el corte para considerar los grupos de variables.....	74

Figura 3.8. Ecuaciones lineales obtenidas de la estandarización de cada indicador seleccionado para evaluar el IDS. Se muestran los indicadores del tipo “más es mejor”. Los puntos azules corresponden al mínimo y máximo valor obtenido para la variable, restando o sumando 10% respectivamente.	76
Figura 3.9. Ecuaciones lineales obtenidas de la estandarización de cada indicador seleccionado para evaluar el IDS. Se muestran los indicadores del tipo “menos es mejor”. Los puntos azules corresponden al mínimo y máximo valor obtenido para la variable, restando o sumando 10% respectivamente.	77
Figura 3.10. Indicadores básicos estandarizados de la función 1, con tendencias de “más es mejor” para los contenidos de MOS y arcilla y “menos es mejor” para el pH. Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados junto a la línea. La ecuación de la recta se ubica en la parte superior del gráfico.	82
Figura 3.11. Indicadores básicos estandarizados de la función 2, con tendencias de “más es mejor” para la conductividad hidráulica (CH) y la relación C/N*, y “menos es mejor” para la densidad aparente (Db) y la respiración (Resp). Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados junto a los extremos de la línea. La ecuación de la recta se ubica en la parte superior del gráfico. * La estandarización de la relación C/N se hizo estableciendo un límite específico, puede observarse la estabilización de la recta para valores mayores de 20.	83
Figura 3.12. Indicadores de la función 3, estandarizados con tendencias de “más es mejor” para el N mineral*, contenidos de P y K disponibles y pH; y tendencias de “menos es mejor” para el contenido de fracción fina (< 2 mm) por unidad de volumen total (Da). Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados en los extremos de la línea. * La estandarización del N mineral se hizo estableciendo un límite específico, puede observarse la estabilización de la recta para valores mayores de 15.	84
Figura 3.13. Correlación entre los valores obtenidos para cada función del suelo utilizando los indicadores básicos y sustitutos en relación a la recta 1:1 (en rojo).	88
Figura 3.14. Correlación del índice de calidad edáfica calculado utilizando los indicadores básicos y sustitutos, en relación a la recta 1:1 (en rojo).	88
Figura 4.1. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación del páramo natural en agricultura intensiva. En las cajas se han representado los compartimientos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.	92
Figura 4.2. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación del páramo natural en ladera degradada. En las cajas se han representado los compartimientos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.	97
Figura 4.3. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación de ladera degradada en ladera retomada. En las cajas se han representado los compartimientos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.	100

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Descripción de algunas propiedades físicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.....	17
Tabla 1.2. Descripción de algunas propiedades químicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.....	18
Tabla 1.3. Descripción de algunas propiedades biológicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.....	19
Tabla 2.1. Localización en coordenadas UTM, altitud, pendiente y orientación de las 16 parcelas seleccionadas y código asignado.....	36
Tabla 2.2. Propiedades edáficas, físicas, químicas y biológicas seleccionadas y los métodos utilizados en el laboratorio para su determinación.....	41
Tabla 2.3. Diferentes mediciones de densidad realizadas utilizando los cilindros con muestras de suelo intactas (PS=peso seco del suelo, V=volumen).....	45
Tabla 3.1. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables físicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P.....	60
Tabla 3.2. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables químicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P.	61
Tabla 3.3. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables biológicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P.....	62
Tabla 3.4. Valores promedio por localidad \pm desviación estándar para las variables que mostraron en el resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) el efecto del bloque, indicando el valor de P.....	63
Tabla 3.5. Valores de correlación de cada variable del suelo con cada uno de los ejes del análisis de componentes principales (ACP). Con n=16, el límite de significancia es $r = 0,4973$, $p < 0.05$	66
Tabla 3.6. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0. Cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.....	70
Tabla 3.7. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0. Cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.....	71
Tabla 3.8. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0, cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.....	72
Tabla 3.9. Valor del R^2 y R^2 acumulado con cada uno de los indicadores considerados por la regresión múltiple arrojada.....	75
Tabla 3.10. Resultados del índice de fertilidad del suelo, para cada tratamiento (pn- páramo natural, sa- suelo agrícola, ld- ladera degradada y lr- ladera retomada) y resultados del IFS con análisis de varianza de dos vías (grupos mostrados con letras a>b>c).....	75
Tabla 3.11. Indicadores seleccionados para evaluar el IDS, se muestra la tendencia de estos indicadores, una ecuación lineal para la estandarización de cada uno y el peso relativo que se le asignó, los cuales suman 1 en total.....	76

Tabla 3.12. Pesos relativos obtenidos por cada indicador y resultado final del índice de degradación edáfico, con análisis de las diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados para el IDS. Considerando a>b>c.....	77
Tabla 3.13. Distribución de los indicadores en las funciones del suelo, tendencias y correlaciones entre ellos, pesos relativos de cada indicador. Peso total de cada función.....	79
Tabla 3.14. Repartición de los pesos relativos asignados a cada una de las funciones del nivel 1 y nivel 2, para cada uno de los modelos planteados. Para un peso total de 1 en cada uno de los modelos.....	85
Tabla 3.15. Índice integrado de la calidad del suelo utilizando el modelo 1. Se muestran los promedios de cada tratamiento \pm desviación estándar, para cada función y el resultado final (ICS). Las letras en los valores finales del índice indican los diferentes grupos que reconoció la prueba estadística, sea a>b>c>d.	86
Tabla 3.16. Índice integrado de la calidad del suelo utilizando el modelo 2. Se muestra el promedio de cada tratamiento \pm desviación estándar, para cada función y el resultado final (ICS). Las letras en los valores finales del índice indican los diferentes grupos que reconoció la prueba estadística, sea a>b>c.....	87

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enfoca en analizar el efecto que han tenido sobre los suelos, diferentes transformaciones ocurridas en el páramo andino venezolano. La llegada de los españoles durante la colonia trajo consigo la implementación en muchas zonas altas, de un sistema de cultivo de trigo que causó una gran degradación de los suelos y el posterior abandono de extensas áreas que quedaron improductivas. Luego, en las últimas décadas, se produce el auge de un sistema de cultivo intensivo que representa otro hito importante en la dinámica del paisaje paramero. Todos estos procesos históricos configuran el paisaje actual, donde se interdigital zonas de páramo natural o poco intervenido, con áreas degradadas por el sistema triguero y abandonadas, y áreas bajo agricultura intensiva. Este paisaje cultural nos llevó a plantearnos la posibilidad de realizar un análisis exploratorio de cómo estos diferentes procesos históricos de transformación pueden visualizarse en el suelo y cómo a partir de este análisis edáfico se pueden interpretar los procesos que han moldeado los paisajes culturales actuales y deducir aspectos relevantes para la evaluación de la sustentabilidad y para la implementación de prácticas de restauración. Para plantear y abordar esta problemática revisaremos primero algunos aspectos teóricos, que nos permitirán definir la complejidad del suelo, su multidimensionalidad y la necesidad de buscar indicadores sensibles al tipo de cambio que se produce cuando ocurre una transformación. Luego veremos como la complejidad del suelo no solo lleva a identificar variables indicadoras sino también a ensamblarlas en índices que permitan evaluar determinados aspectos (calidad, grado de degradación, fertilidad) a partir de la combinación de algunas variables. Una vez presentados estos aspectos generales, pasamos a describir con más detalle la dinámica del uso de la tierra y los procesos históricos en el área de estudio. Posteriormente se revisan someramente algunos antecedentes generales referentes a la respuesta del suelo a cambios en el manejo y se revisan los estudios más específicos realizados en el páramo. Todo este contexto nos permite finalmente poder plantear las hipótesis y los objetivos de la investigación.

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 El Suelo

El suelo es un sistema natural, abierto al intercambio de energía y materia; representa un compartimiento particularmente complejo de los ecosistemas terrestres pues tiene muchos componentes que interactúan entre sí en diferentes escalas espacio-temporales. Se transforma con la acción de agentes bióticos y abióticos y constituye el hábitat de gran diversidad de seres vivos. Consta de una fase sólida, una líquida y una gaseosa, que interactúan entre sí. La fase sólida a su vez está conformada por un componente mineral, uno orgánico y uno biológico; esto nos permite hablar del suelo en base a sus propiedades físicas, químicas y biológicas y los procesos que suceden en él (*Brady y Weil, 1999; Chapín y col, 2002*).

Las propiedades del suelo están influidas y al mismo tiempo ejercen una gran influencia sobre muchos procesos ecosistémicos, como el balance hídrico, el flujo de energía y el ciclado de nutrientes. Todos ellos están estrechamente relacionados entre sí y no pueden ser tratados por separado, pues los tres son vitales para el funcionamiento del ecosistema (*Brady y Weil, 1999; Labrador, 2008*). Por ejemplo, el balance hídrico está regulado por el flujo energético y a su vez el ciclado de nutrientes depende directamente del balance hídrico en el suelo (*Chapín y col, 2002*).

El correcto funcionamiento de estos procesos mantiene algunos de los servicios que el suelo presta al ser humano, entre estos: (1) actuar como ente de almacenamiento y provisión de agua y nutrientes para la producción agropecuaria y el consumo humano, (2) actuar como filtro, regulador y transformador de la materia, protegiendo el ambiente de compuestos en formas tóxicas y favoreciendo la salud de plantas, animales y humanos, (3) representar el medio físico y la fuente de recursos para mantener el hábitat biológico y las reservas genéticas que lo caracterizan, y (4) intervenir en el almacenamiento de materia orgánica, lo que le permite regular el ciclo del carbono (*Brady y Weil, 1999; Chapín y col, 2002; Bautista y col, 2004; Cantú y col, 2007; Labrador, 2008*).

En este sentido, el buen desarrollo de los procesos ecosistémicos en el suelo se asocia con lo que se ha denominado la calidad edáfica, que ha sido un tema de interés desde la antigüedad y se evalúa en base a la multifuncionalidad del suelo y no sólo en función de un aspecto específico. Esto se hace mediante el análisis de algunos atributos como la fertilidad, la productividad potencial, la sustentabilidad y la calidad ambiental (*Sojka y col, 2003; Bautista y col, 2004; Labrador, 2008 y Martínez-Salgado y col, 2010*); también considerada como la condición que tiene el suelo de salvaguardar su fitness; refiriéndose a “fit” cuando las características de dicho compartimiento lo mantienen saludable en el tiempo ante un particular uso de la tierra (*Schipper y Sparling, 2000*). En el caso de los agroecosistemas se puede definir la fertilidad del suelo como la capacidad que tiene dicho compartimiento, bajo un sistema de manejo dado, de proveer nutrientes al cultivo de acuerdo a sus requerimientos (*Sarmiento y col, 2001; Labrador, 2008*). Esta capacidad la determinan las interacciones que suceden entre los componentes bióticos, la materia orgánica del suelo (MOS) y su matriz mineral o física. Es importante considerar que la sustentabilidad de los agroecosistemas depende en gran medida de cómo afecten las prácticas agrícolas a mediano y largo plazo, la estructura y el funcionamiento del suelo (*Bautista y col, 2004; Cantú y col, 2007*).

1.1.2 Efecto de las transformaciones sobre el sistema suelo

Partiendo de la importancia de este compartimiento sobre el buen funcionamiento de los ecosistemas, resulta clave evaluar el efecto que tiene sobre el suelo algunos de los manejos implementados por el hombre, particularmente los relacionados con la actividad agrícola.

Así, cabe mencionar que prácticas como la deforestación, dificultan la colonización de algunas especies nativas y dejan el suelo desprovisto ante la erosión por eliminar la cobertura vegetal (*Islam y Weil, 2000; Chapín, 2002*). Las quemas liberan nutrientes previamente no disponibles para las plantas, haciéndolos vulnerables a pérdidas por lixiviación o volatilización. El arado contribuye con la oxidación de la MOS, la destrucción de los agregados y por tanto la liberación de nutrientes. Por otra parte, está asociado con la pérdida de la estructura del suelo, que a largo plazo genera su compactación y una menor capacidad de retención de agua; se ha observado además, que aumenta la respiración del suelo, probablemente debido a la destrucción de los agregados, lo que estimula la descomposición de la MOS y liberación de nutrientes (*Gómez y col, 1996; Islam y Weil, 2000; Chia Hsing y col, 2006*); también genera una mayor infiltración en los suelos, aunque a largo plazo esta práctica ocasiona pérdidas en la calidad edáfica (*Diack y Stott, 2001*). El pastoreo aumenta significativamente la compactación, afectando directamente las propiedades físicas del suelo y modificando los flujos de agua internos (*Buytaert y col, 2005*). La fertilización orgánica y mineral altera los flujos de nutrientes (N, P, K, etc) en el ecosistema, por lo general, aumentando la fertilidad del suelo (*Bending y col, 2004; Marinari y col, 2006; Chia Hsing y col, 2006*). Sin embargo, puede llegar a saturar los suelos y estimular la nitrificación por adición excesiva de fertilizantes amoniacales (*Chapín, 2002*). El exceso de algunos nutrientes puede generar a la vez la pérdida de otros, al saturarse el complejo de intercambio catiónico ocasionando así el empobrecimiento del suelo; la

fertilización también tiene un efecto claro sobre las poblaciones microbianas, aumentando la respiración del suelo cuando reciben enmiendas (*Bending y col, 2004; Marinari y col, 2006*) y aumentando a largo plazo la conductividad eléctrica por acumulación de sales, sobre todo en climas semiáridos (*Chia Hsing y col, 2006*). La cosecha representa salidas considerables de materia orgánica y de nutrientes del ecosistema, que cuando no son repuestas causan la disminución progresiva de la materia orgánica del suelo, muy importante para un conjunto amplio de funciones. Finalmente la irrigación aunque ayuda con el mantenimiento de la biomasa vegetal, puede ocasionar la disminución de oxígeno en los poros del suelo cuando se aplica en exceso, lo que estimularía procesos de pérdida como la desnitrificación; asimismo puede incrementar la descomposición del material orgánico, estimular el lavado de los nutrientes, las arcillas y la MOS, la salinización, la erosión y por tanto el empobreciendo del suelo.

1.1.3 Indicadores de cambios en la calidad del suelo

Dentro de este orden de ideas, cabe recalcar que la protección de este recurso natural requiere de un buen manejo, haciendo necesario contar con indicadores que permitan evaluar su calidad y verificar periódicamente que las prácticas realizadas no estén causando una degradación progresiva que pueda comprometer la sustentabilidad de los sistemas de producción. La selección de los indicadores de calidad edáfica debe hacerse considerando aquellas propiedades con funciones específicas en el suelo, que resulten sensibles a los cambios en la fertilidad y calidad del suelo, y reflejen variaciones en escalas espacio-temporales, considerándose indicativas del funcionamiento de los servicios ecosistémicos (*Karlen, y col. 1994; Glover y col, 2000; Bautista y col, 2004; Marinari y col, 2006; Chia Hsing y col, 2006*). Así se ha calificado un indicador, como una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible; también cuantifica, mide y comunica de manera comprensible, información importante de ese compartimiento. Estos deben ser preferiblemente, variables de tipo cuantitativo; sin embargo existen algunos indicadores cualitativos (*Glover y col, 2000; Cantú y col, 2007*). Los indicadores de calidad del suelo suelen clasificarse según se refieran a propiedades o procesos físicos, químicos o biológicos.

Las propiedades físicas (Tabla 1.1), dependen fundamentalmente de la “estructura del suelo” y se relacionan directamente con la manera en que el suelo infiltra, retiene y percola agua y la transmite a las plantas, considerando algunos flujos como la infiltración, el lavado y la erosión. Estas propiedades también se relacionan con las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces o la emergencia de las plántulas. Algunas de las propiedades físicas, como la textura, son difícilmente recuperables después de haberse modificado. De ahí su interés respecto a la fertilidad y calidad del suelo (*Brady y Weil, 1999; Guitian y Carballas, 1976; Chapín y col, 2002; Bautista y col, 2004*). Las propiedades químicas (Tabla 1.2) se relacionan con la concentración de elementos o sustancias en el suelo y tienen mucha influencia en las relaciones suelo-planta, la calidad del agua y la disponibilidad de nutrientes para la vegetación y los microorganismos edáficos (*Brady y Weil, 1999; Chapín y col, 2002*). Finalmente, las propiedades biológicas (Tabla 1.3) incluyen compartimientos como la biomasa microbiana, cantidades de bacterias, hongos, nemátodos, anélidos, artrópodos y otros habitantes del suelo, y algunas funciones como la respiración, la producción de ergosterol, tasas de descomposición de residuos vegetales, fijación de N, nitrificación, etc. Los indicadores microbiológicos y bioquímicos del suelo pueden ser usados para evaluar su calidad en términos de sustentabilidad (*Brady y Weil, 1999; Chapín y col, 2002; Marinari y col, 2006*).

Los indicadores de calidad del suelo deben cumplir con las siguientes condiciones (*Bautista y col, 2004; Cantú y col, 2007; Abreu y col, 2009*): a) ser sencillos, fáciles de medir y arrojar información

relacionada a otras propiedades; b) describir o relacionarse con algunos procesos o servicios ecosistémicos de interés; c) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; e) tener una baja variabilidad espacio-temporal para evitar las variaciones por factores climáticos, tan fluctuantes en la alta montaña tropical; f) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo, además de ser reproducibles; g) ser sensibles a la degradación antrópica y mientras sea posible, h) ser componentes de una base de datos ya existente.

Debe señalarse que no existe un grupo de propiedades que pueda usarse como indicadores de la calidad del suelo de manera estándar debido a que la diversidad de condiciones bajo las que se encuentran los suelos degradados y/o transformados es muy alta y depende de las prácticas de manejo que éstos reciban (*Schipper y Sparling 2000; Glover y col, 2000; Sojka y col, 2003*); por eso, es importante resaltar que los indicadores de estado del recurso suelo no son universales. Por el contrario, debe seleccionarse un subgrupo de indicadores en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio (*Cantú y col, 2007*) y sobre todo del tipo de procesos de transformación que se estén evaluado.

1.1.4 Índices de Calidad del Suelo

Dentro de este marco, surgen como estrategias más prácticas para evaluar el estado del suelo, la aplicación de índices de calidad edáfica; estos consisten en la combinación matemática de varios indicadores asociados con algunas funciones del suelo y sirven como una herramienta integradora para diagnosticar el estado global del suelo, facilitando el estudio de los diferentes niveles de degradación y ayudando en la evaluación de planes de restauración o sustentabilidad de los sistemas productivos. Para plantear un índice integrado de calidad, se seguirán los lineamientos de *Karlen y col, (1994); Glover y col, (2000)* que proponen considerar algunas funciones del suelo, asociadas con su calidad, como la capacidad de retener y transferir agua, resistir la degradación y representar un soporte óptimo para el desarrollo vegetal. *Andrews y col, (2002)*, plantean que las funciones seleccionadas para conformar el índice nos deben permitir reconocer aquellos manejos más sustentables.

Algunas consideraciones al momento de construir un índice son: (1) La selección de los indicadores, (2) la interpretación de los mismos y (3) la integración de estos en un índice (*Chia –Hsing y col, 2006*). Para la selección de los indicadores se recomienda prescindir de algunas variables que puedan mostrar fuertes correlaciones con otras ya incluidas, acudir a la opinión de expertos y además considerar las correlaciones de cada variable con los ejes de los análisis multivariados y así reducir el costo y trabajo de la evaluación (*Schipper y Sparling, 2000; Andrews y col, 2002*).

Una vez seleccionados los set mínimos de indicadores para valorar la calidad del suelo con diferentes enfoques, estos son evaluados para reconocer sus tendencias, de incremento o disminución con la calidad del suelo, para ser estandarizados e integrados en el índice ya que cada uno suele presentar una unidad y magnitud diferente; cada uno además deberá tener un peso relativo según su importancia dentro de la función del suelo en la que se encuentra (*Chia –Hsing y col, 2006*). Así mismo, se asignan pesos relativos a las funciones del suelo; los cuales pueden además ser cambiados para reflejar prioridades diferentes o necesidades particulares según la interpretación que se le quiera dar al índice, de esta manera se tiene una forma más integrada para evaluar la calidad edáfica (*Glover y col, 2000*).

TABLA 1.1. Descripción de algunas propiedades físicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.

PROPIEDADES FÍSICAS	
Textura	Abundancia relativa de las diferentes fracciones granulométricas (arcillas, limos y arenas). Modula la estructura del suelo, la estabilidad de los agregados y es determinante en la erosión y resistencia a disturbios. Tiene una gran influencia sobre otras propiedades como la capacidad de retener agua y nutrientes y es de muy lenta o nula recuperación después de un disturbio (<i>Guitian y Carballas, 1976; Brady y Weil, 1999; Labrador y col, 2008</i>).
Densidad aparente	La relación entre la masa y el volumen del suelo, incluyendo el espacio ocupado por partículas y poros. Arroja información útil sobre el espacio disponible para retener agua y permitir mejor circulación de aire y CO ₂ y el crecimiento de raíces y organismos edáficos. Se correlacionaron la compactación y velocidad de infiltración en el suelo (<i>Guitian y Carballas, 1976; Brady y Weil, 1999; Schipper y Sparling, 2000; Cartes y Gregorich, 2006</i>).
Capacidad Campo y Punto de Marchitez Permanente	La capacidad de campo (CC) es el contenido de agua en el suelo luego de perder el agua gravitatoria, el punto de marchitez permanente (PMP) se refiere al contenido de agua en la transición entre “agua útil” para las plantas y el agua retenida por fuerzas mayores a la fuerza de succión de la vegetación. Ambos parámetros asociados con las relaciones suelo – planta y por tanto con la fertilidad. Es importante recalcar que la CC y el PMP dependen mucho del tamaño, y disposición de las partículas del suelo (textura), además de la naturaleza de los minerales presentes y el contenido de MOS (<i>Guitian y Carballas, 1976; Brady y Weil, 1999; Pansu y Gautheyrou, 2006</i>).
Contenido de Agua en Saturación	Es la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo cuando todos sus poros están llenos, depende del tamaño de las partículas constitutivas del suelo (a menor tamaño mayor capacidad de retención de agua), de la porosidad y de la riqueza de sustancias hidratantes en el suelo (<i>Guitian y Carballas, 1976; Brady y Weil, 1999</i>).
Conductividad Hidráulica	Se refiere a la capacidad del suelo para percolar agua desde su superficie. Este parámetro influye sobre la capacidad de retención de agua y el comportamiento hidrológico del suelo, aportando información asociada a la tasa de infiltración y algunas otras propiedades de drenaje en el suelo. Es una propiedad muy sensible al manejo (<i>Brady y Weil, 1999; Schipper y Sparling, 2000; Rodríguez, 2010</i>).

TABLA 1.2. Descripción de algunas propiedades químicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.

PROPIEDADES QUÍMICAS	
Contenido de MOS	Contenido de diferentes sustancias de naturaleza orgánica en el suelo. Asociado a varios procesos que resultan vitales para el funcionamiento del suelo, como el abastecimiento de nutrientes y agua, además de mejorar significativamente la estructura del suelo disminuyendo la densidad aparente y se asocia muy bien con la fertilidad (<i>Schulte, 1995; Brady y Weil, 1999; Labrador y col, 2008</i>).
pH	Logaritmo negativo de la concentración de protones e indica el grado de acidez del suelo. Depende del material parental y está fuertemente influenciado por el contenido de sales. Resulta de gran importancia por afectar directamente la disponibilidad de los nutrientes y algunos procesos del suelo, como la nitrificación que es inhibida a pH ácidos (<i>Brady y Weil, 1999; Chapin, 2002; Pansu y Gautheyrou, 2006</i>).
Conductividad Eléctrica	Es la capacidad que tiene el suelo de conducir electricidad, siendo proporcional a la cantidad y naturaleza de las sales disueltas en la solución del suelo, así que se usa como indicador del grado de salinización de un suelo (<i>Brady y Weil, 1999; Pansu y Gautheyrou, 2006</i>).
Capacidad Intercambio Catiónico	Es la suma total de cationes intercambiables que el suelo puede retener gracias a sus cargas negativas, contenidas en las arcillas y la materia orgánica. (<i>Brady y Weil, 1999; Pansu y Gautheyrou, 2006</i>).
Bases Cambiables	Son las cuatro bases (Ca, Mg, Na y K) que se intercambian entre la solución del suelo y cualquier otra superficie del suelo cargada negativamente, como la arcilla o la MOS. Se asocia fuertemente con la fertilidad del suelo. El calcio, facilita la absorción de otros nutrientes como P, neutraliza los efectos negativos del Al y Mn. El magnesio, constituyente de la clorofila, es vital para la nutrición vegetal. El potasio es crucial por su alta concentración en la biomasa vegetal. En general se correlacionan positivamente con la vida microbiana y tienen la propiedad de regular el pH del suelo (<i>Brady y Weil, 1999; Pansu y Gautheyrou, 2006; García, 2010</i>).
Fósforo disponible	Es el segundo elemento con mayor importancia para la nutrición de las plantas, juega un importante papel agronómico además de ser vital en los ciclos biogeoquímicos. Su accesibilidad para las plantas disminuye al disminuir el pH (<i>Pansu y Gautheyrou, 2006; García, 2010</i>).
Nitrógeno	Es uno de los elementos esenciales para la nutrición de las plantas, relacionado positivamente con la fertilidad del suelo. Sus formas minerales (NH_4^+ y NO_3^-) son accesibles a las plantas, sin embargo las sales amónicas fijadas en las capas de arcilla sólo pueden ser extraídas por el intercambio con otros iones, a diferencia del nitrato que es soluble en agua y susceptible a perderse por precipitación o irrigación en caso de suelos agrícolas. La forma de N más abundante en el suelo es el N orgánico no disponible para las plantas (<i>Pansu y Gautheyrou, 2006</i>).

TABLA 1.3. Descripción de algunas propiedades biológicas del suelo, incluyendo su importancia y la relación que tienen con otros atributos.

PROPIEDADES BIOLÓGICAS	
Respiración microbiana	Se refiere a la oxidación biológica de la MOS, su producto es CO ₂ en forma gaseosa y está regulada por los organismos aeróbicos del suelo, los cuales ocupan una posición clave en el ciclo global del C. Esta variable se correlaciona positivamente con el contenido de materia orgánica y su calidad, con la biomasa microbiana y con su actividad. Puede ser un indicador sensible de cambios en el uso de la tierra. Está altamente influenciado por la temperatura, la humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Resulta ser muy sensible a las condiciones ambientales (<i>Nielsen y Winding, 2002</i>).
Bacterias Heterótrofas	Este grupo de microorganismos utiliza compuestos orgánicos complejos como fuente de energía y C. Cumple un rol importante en la descomposición de la MOS y el ciclado de nutrientes, participando en la liberación de nutrientes para el consumo de las plantas (mineralización). Responde clara y rápidamente a los cambios en numerosos factores ambientales, como el pH, la textura, el contenido de MOS, el tipo de vegetación, entre otros (<i>Diz-cid, 2003; Gonzales, 2004; Martínez-Salgado y col, 2010</i>).
Relación Oligotrofos/ Copiotrofos	Relación entre los microorganismos adaptados a ambientes con poca disponibilidad de nutrientes (estrategia K: Oligotrofos); con aquellos que se reproducen rápidamente (estrategia r: Copiotrofos), adaptados a ambientes con gran disponibilidad de nutrientes. Una relación alta refleja un ambiente estable, con poblaciones microbianas de lento crecimiento; cuando la relación es baja el suelo se considera alterado, con alta disponibilidad de nutrientes que indican entradas constantes de enmiendas (<i>Nielsen y Winding, 2002; García, 2010</i>).
Población de Proteolíticos	La Proteólisis es un proceso crucial en el mantenimiento de la calidad del suelo y su productividad. Durante la degradación hidrolítica de los polipéptidos de la necromasa el N es movilizado constituyendo un paso fundamental del ciclado de dicho elemento. Sin este proceso, el N orgánico no podría tomar una forma que sea disponible para las plantas (N mineral). Las proteasas son las enzimas responsables de esta degradación de polipéptidos y estas son las producidas por los organismos proteolíticos (<i>Mrkonjic y col, 2008</i>).
Población de Celulolíticos	Estos forman parte de los organismos asociados al ciclo del C, se especializan en degradar la celulosa. Son muy importantes, pues representan un eslabón imprescindible en la descomposición de los restos vegetales y por tanto, su contribución al ciclo de la materia orgánica es fundamental (<i>Diz-Cid, 2003</i>).

1.1.5 Historia de uso de los suelos en el valle alto del Chama

En el piso más alto de los Andes del Norte se encuentra el ecosistema Páramo, que aparece aproximadamente a partir de los 3000 m de altitud y se extiende desde el norte de Perú hasta Venezuela (*Monasterio, 1980; Monasterio y Celecia, 1991*). Éste se caracteriza por resguardar una gran diversidad biológica, refiriéndose a diversidad de especies y diversidad genética (*Sarmiento y col, 2001; Monasterio y Celecia, 1991*); presenta un gran número de endemismos como resultado de la adaptación de sus especies a las condiciones únicas de trópico frío. Presta algunos servicios ecosistémicos, como la producción y regulación de los flujos hídricos y cumple un papel vital en la producción de rubros agrícolas específicos como la papa, el ajo y la zanahoria, de gran importancia económica nacional (*Monasterio, 1980*). Uno de los principales problemas para el manejo sustentable y la conservación de la biodiversidad en las altas montañas andinas es la fragilidad de sus laderas, que han sido muy explotadas, principalmente para la producción agrícola. Su degradación además, trae consecuencias negativas sobre el ciclo hidrológico en el ecosistema y en las zonas bajas adyacentes al páramo andino (*Monasterio, 1980; Monasterio y Celecia 1991; Sarmiento y col, 2001*).

Dentro de este contexto cabe mencionar que en épocas precolombinas el páramo en Venezuela mostraba pequeñas poblaciones humanas que se dedicaban al cultivo de papa y maíz y que dejaron abundantes evidencias arqueológicas de su actividad agrícola y cultural en varios núcleos importantes como la cuenca del río Motatán, la cuenta del río Chama y la cuenca del río Nuestra Señora (Figura 1.1). Dicha distribución se relaciona con la presencia de los bolsones secos intermontanos en esta cordillera; que presentan menores precipitaciones que lo reportado para los páramos adyacentes. Estos son ecosistemas que constituyeron centros de mayor concentración de asentamientos agrarios. Particularmente en el valle alto del río Chama se observan otros sistemas agrícolas practicados en valles más altos y húmedos, agricultura de barbecho, caracterizada por reponer la fertilidad de los suelos mediante su abandono (*Carnevalli, 1944; Monasterio, 1980*).

Para el siglo XVI, esta región sufre el fuerte impacto de la empresa colonial española, adoptando una agricultura cerealera de secano con la introducción de trigo, avena y cebada en los bolsones secos de los andes venezolanos. La empresa colonial se sobrepuso con prácticas aborígenes y la población local fue utilizada como mano de obra por los españoles iniciándose el proceso de colonización agrícola, donde se integraron cultivos indígenas con los nuevos rubros introducidos. Se observó un incremento de la superficie de tierra utilizada para la agricultura, donde se incluyeron suelos más frágiles sin recurrir a técnicas conservacionistas (*Monasterio, 1980; Monasterio y Celecia, 1991*). Esta época se asocia fuertemente con la producción triguera, pues el cereal llegó a ser un importante elemento de exportación, mientras que el cultivo de tubérculos se mantuvo para el consumo local y regional (*Carnevalli, 1944*).

Las principales prácticas empleadas en el cultivo de trigo incluyendo su infraestructura tecnológica eran: tracción animal por bueyes, arado de madera, eras para trillar el cereal, molinos hidráulicos, entre otros (*Monasterio, 1980; Monasterio y Celecia, 1991*). Para el año 1818, ya no era rentable la exportación de trigo debido a la competencia de precios más bajos en el mercado internacional por la producción masiva de Canadá, USA y Argentina, además de la baja productividad de las cosechas debido al agotamiento de los suelos (*Carnevalli, 1944; Monasterio, 1980*). Actualmente el cultivo de trigo ha desaparecido casi completamente o se cultiva a muy pequeña escala para el autoconsumo. Sin embargo, ha dejado una huella tanto cultural como de degradación en los paisajes de alta montaña andina como un testimonio de un sistema agrícola no sustentable y no adaptado a las condiciones del medio. Se observa la presencia de eras, molinos y casas de la

época triguera como relictos culturales y la erosión de las laderas trigueras como consecuencia de la degradación del paisaje, con numerosas cárcavas asociadas a las altas pendientes de los terrenos, los frecuentes arados realizados, el monocultivo de trigo, los cortos períodos de descanso, la poca reposición de nutrientes extraídos, la poca incorporación de MOS y el pisoteo por el ganado (Monasterio, 1980).

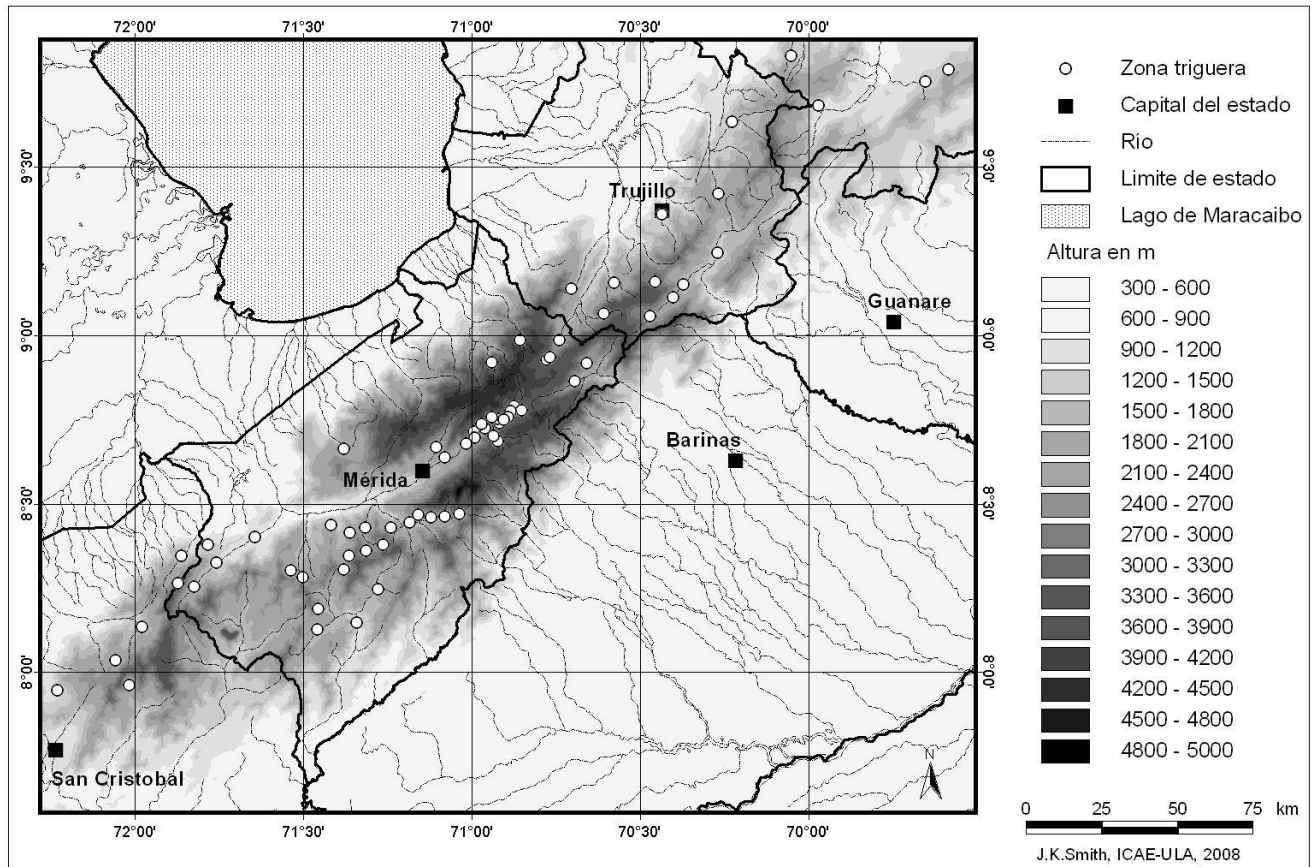


FIGURA 1.1. Mapa de Mérida. Resaltados con puntos blancos, los centros de producción triguera durante la época de la colonia (Tomado de J.K. Smith).

Posteriormente a mediados del siglo XX se inicia el actual período papero. La introducción de nuevas variedades (como la papa blanca), ha tenido implicaciones socio-económicas favorables a corto plazo, pero que pudieran ser desfavorables a largo plazo por la pérdida de biodiversidad y el aumento de riesgo de degradación de los suelos al realizar un cultivo más intensivo reduciendo los años de descanso de los suelos (Sarmiento y Monasterio, 1993) donde se ha hecho necesaria la adición de grandes cantidades de enmiendas químicas y orgánicas para mantener la productividad de los cultivos (Machado, 2005). El impacto de este sistema de manejo sobre los suelos evidencia una nueva problemática asociada a la fertilidad que es altamente dependiente de las enmiendas orgánicas y minerales agregadas, de alto costo energético, que acarrear además consecuencias ambientales y sanitarias muy delicadas. Además, crean una dependencia tecnológica con las industrias de los países desarrollados que envían algunos productos vetados y considerados tóxicos para su población (Monasterio, 1980). Es necesario recalcar que el uso de fertilizantes se ha realizado sin una buena base científica, lo que ha generado problemas de uso excesivo y contaminación que van de la mano con un bajo aprovechamiento por parte de los cultivos, incidiendo en la rentabilidad económica, por lo que resulta necesario desarrollar estrategias de manejo más

eficiente de los nutrientes y así optimizar el uso de los fertilizantes y minimizar sus efectos negativos (*Machado, 2005*).

Merece la pena contrastar las prácticas agrícolas durante el periodo triguero, cuando no se reponía materia orgánica y nutrientes al suelo, lo cual llevó a su erosión y a la pérdida de la fertilidad; con las prácticas actuales del sistema papero, que aportan grandes cantidades de C al suelo a través de la aplicación de gallinazo y de cáscara de arroz y que reponen masivamente algunos nutrientes. Esto hace que la problemática de la transformación del suelo sea muy diferente. Al incrementar los aportes de materia orgánica en un ecosistema, puede mejorar notoriamente la calidad del suelo en comparación con las condiciones de las laderas degradadas. Este contraste, entre las prácticas agrícolas pasadas y presentes hace pensar que la utilización de la agricultura intensiva en laderas degradadas podría ayudar a la restauración de sus suelos. El avance de la frontera agrícola sobre las laderas degradadas es un fenómeno que está documentado para la última década y se produce por la falta de otras tierras para la expansión agrícola (*Smith, comunicación personal*). Nosotros denominaremos laderas retomadas a los suelos degradados que han sido utilizados la producción agrícola, mediante la adición de materia orgánica y el empleo de las prácticas de la agricultura intensiva.

En este escenario dinámico de uso de la tierra, que incluye procesos históricos de degradación y procesos más actuales de transformación y cambio de uso, surgen algunas preguntas en torno a las cuales hemos desarrollado nuestra investigación:

¿Qué cambios han ocurrido en el suelo andino como consecuencia de la degradación de las laderas trigueras? ¿Qué propiedades edáficas deben recuperarse para restaurar los suelos degradados?, ¿Qué efecto tiene la agricultura actual sobre el suelo considerando la sustentabilidad del sistema?, ¿Es la retoma de las laderas degradadas por la agricultura, una posible estrategia para recuperar los suelos agotados por el ciclo triguero?

1.2 ANTECEDENTES

Múltiples estudios sobre el impacto de diferentes sistemas de manejo en el suelo y su evaluación a través de indicadores se han realizado en otros ambientes diferentes al paramo en cuanto a su ubicación y condiciones ambientales. Estos trabajos, son de mucha utilidad para evaluar las posibles respuestas del suelo ante diferentes tipos de disturbios. Sin embargo, no podemos hacer más que una mención muy restringida de estos estudios, más a nivel de ejemplo, que de revisión o de síntesis, ya que esta última labor superaría con creces las metas de este trabajo de investigación. Tenemos ejemplos interesantes de cómo evaluar el efecto del manejo sobre el suelo a través de indicadores, comparando sistemas de manejo contrastantes entre sí con el ecosistema natural; así encontramos que las prácticas menos intensivas con inclusión de MOS (*Bending y col, 2004; Marinari y col, 2006; Chia Hsing y col, 2006*) mejoran la estructura del suelo, incrementan la disponibilidad de los nutrientes y mejoran calidad edáfica; sin embargo, las altas aplicaciones de MOS a los cultivos, genera a largo plazo un incremento en la conductividad eléctrica y podría generarse la eutrofización del medio; también se ha observado un aumento de la respiración del suelo, probablemente debido a los contenidos de MOS lábil presente. Otros sistemas de manejo más intensivos donde se utilizan con frecuencia prácticas como el arado (*Gómez y col, 1996; Islam y Weil, 2000; Diack y Stott, 2001; Chia Hsing y col, 2006*) han mostrado incrementos en la infiltración, aunque a largo plazo generan la pérdida de las fracciones de arcilla y limo y la destrucción de la superficie del suelo y su

compactación. Por el contrario, suelos que no reciben labranza muestran mayores tasas de acumulación de C orgánico y N disponible, conservando su estructura y por tanto resistiendo mejor a la degradación.

Ya como antecedentes más directos, para los páramos andinos venezolanos pueden mencionarse dos grupos de estudios en los que se ha intentado detectar cambios en las propiedades edáficas debido al manejo o historia de uso, utilizando diferentes tipos de indicadores:

1) Los cambios edáficos en una sucesión secundaria en los sistemas agrícolas con descanso largo. Este tema ha sido objeto de considerable atención incluyendo un gran proyecto internacional denominado TROPANDES. En este grupo se incluyen los trabajos de *Llambí y Sarmiento (1997 y 1998)*, *Abadín y col. (2002)*; *Sarmiento y Bottner (2002)*; *Gonzales (2004)*; *Abreu y col. (2009)*.

2) Los estudios en suelos degradados por el sistema triguero y en suelos sometidos a agricultura intensiva, comparándolos con suelos de páramo natural, donde se incluyen los trabajos de *Machado (2005)*; *Felicien (2008)*; *Toro (2008)*; *García (2010)*; *Sarmiento y Smith (2011)* y *Stelzer (1992)*.

Los estudios sobre los cambios sucesionales a nivel del suelo en sistemas agrícolas con descansos largos muestran pocas tendencias significativas en el suelo durante los primeros 10-12 años de sucesión en ambientes de páramo ubicados en los valles más altos y húmedos, fuera de los bolsones secos. La falta de respuesta de muchas de las variables edáficas se relaciona con la poca sensibilidad que tienen ante el manejo utilizado, las complicaciones que trae la pequeña escala de tiempo examinada, pues los cambios ocurridos en la sucesión son muy lentos, la alta heterogeneidad espacial de algunas variables (la topografía, exposición, pendiente, altitud, etc.) características de los ambientes de montaña tropical y la dificultad metodológica que implica detectar cambios pequeños en compartimientos grandes (Ejemplo: MOS), o cambios en compartimientos muy dinámicos (Ejemplo: N mineral) (*Abreu y col, 2009*). Sin embargo *Sarmiento y Bottner (2002)* y *Abreu y col. (2009)* encontraron algunas propiedades que mostraron tendencias claras en la sucesión, estas fueron el pH, el Mg y la biomasa microbiana, que aumentaron durante los años de descanso. Por otra parte, al comparar suelos de páramos naturales con los suelos en sucesión se encontró una mayor sensibilidad de las propiedades edáficas, reportando, páramos con mayores contenidos de N total, menor potencial de nitrificación y por tanto menos pérdidas de N que las parcelas sucesionales (*Llambí y Sarmiento, 1997 y 1998*; *Gonzales, 2004*); un decrecimiento del P disponible a lo largo de la sucesión y las mayores diferencias entre el páramo natural y las parcelas en sucesión (*Abadín y col, 2002*) las tendencias a disminuir en la sucesión para el P disponible y la tendencia contraria en los contenidos de Ca^{++} y Mg^{+} que aumentan en la sucesión en comparación con el páramo natural, igual que en la población de bacterias heterótrofas y los organismos proteolíticos (*Gonzales, 2004*)

Dentro del segundo grupo de antecedentes, comparando suelos con condiciones contrastantes, ya sea por su manejo actual o historia de uso, tenemos a *Stelzer (1992)*, *Machado (2005)*, *Felicien (2008)*, *Toro (2008)*, *García (2010)*, *Sarmiento y Smith (2011)*, quienes contrastan las condiciones edáficas en suelos de páramo natural, agricultura intensiva y ladera degradada por el cultivo de trigo en el valle alto del río Chama. Algunos resultados relevantes de estos estudios previos son:

Cambios en el contenido de MOS. *Felicien (2008)* comparando tres suelos encontró que el de páramo natural tiene en promedio un contenido de carbono orgánico de 7,82 %; el suelo agrícola de 3,63 % y

la ladera degradada de 1,48 %, aunque esta comparación no tiene base estadística ya que se hace únicamente con tres parcelas (una por cada sistema de manejo) ubicadas en diferentes zonas del valle. Por otro lado, *Sarmiento y Smith (2011)*, comparando 92 suelos (11 suelos de páramo natural y los demás en un gradiente de degradación), encontraron que el contenido de carbono orgánico en el páramo natural (4,99 %) es el doble que en las laderas degradadas (2 %), esta vez con diferencias estadísticamente significativas. Por su parte, *Stelzer (1992)*, comparando parcelas agrícolas con bordes de parcelas no cultivadas, encontró un incremento del contenido de MOS con la transformación a agricultura intensiva, que puede ocurrir debido a los abonos aplicados en los suelos cultivados. Finalmente, *García (2010)*, no encuentra diferencias importantes en el contenido de MOS entre suelos agrícolas y suelos de páramo natural, comparando dos pares de parcelas. Podríamos entonces resumir que con los antecedentes disponibles resulta una clara tendencia a disminuir la MOS en las laderas degradadas y una tendencia poco clara y contradictoria en los suelos agrícolas con respecto al páramo natural.

En cuanto al contenido de arcilla, se reporta una disminución con la degradación de los suelos (*Sarmiento y Smith, 2011; Sarmiento y col, en prensa*), mostrando una disminución del 48 % entre el páramo natural y los suelos con mayor grado de degradación. *García (2010)* también encontró disminuciones significativas de los contenidos de arcilla (del 50 %), con la transformación a agricultura intensiva.

Los puntos de retención hídrica mostraron páramos naturales con los valores más altos, suelos cultivados con valores intermedios y los valores menores para las laderas degradadas (*Felicien, 2008*). Las mismas tendencias de disminución para los puntos de retención hídrica con la agricultura, encontró *García (2010)*, aunque únicamente en la localidad de Los Bahitos.

Los diferentes trabajos encontraron una clara diferencia en el pH de los suelos, donde los suelos agrícolas mostraron los valores más altos, seguidos por las laderas degradadas y los páramos con los suelos más ácidos (*Stelzer, 1992; Machado, 2005; Felicien, 2008; Sarmiento y Smith, 2011*). Las diferencias encontradas están en el orden de 2 a 3 unidades de pH entre los extremos.

La saturación de bases y CIC en suelos con agricultura intensiva son altas por los suministros de cal y por las grandes entradas de sustratos orgánicos que han generado un suelo saturado de nutrientes en formas lábiles (*Machado, 2005; García, 2010*). En los suelos degradados se encuentran disminuciones de la CIC mientras que la saturación de bases aumentó en comparación con lo reportado para los páramos naturales (*Sarmiento y Smith, 2011*). La diversidad funcional de la microbiota entre parcelas agrícolas y páramos fue analizada por *García (2010)*, encontrando un aumento de las poblaciones microbianas con la transformación, sin embargo el único aumento significativo observado fue para los organismos celulolíticos, con una diferencia de una unidad logarítmica en el número más probable de organismos por gramo de suelo.

Los diferentes antecedentes reseñados nos permiten concluir que en la zona de estudio, el proceso de degradación debido al sistema triguero fue de gran magnitud, pudiéndose detectar claramente por la impronta que dejó en el suelo (*Felicien, 2008; Sarmiento y Smith, 2011*). El efecto del sistema agrícola con descansos largos, sobre el suelo; poco intensivo en sus prácticas de manejo, causa un impacto menor sobre este compartimiento, que sin embargo se detecta en algunos indicadores como el pH, los contenidos de Mg^+ y la biomasa microbiana (*Llambí y Sarmiento, 1997 y 1998; Abadín y col, 2002; Gonzales, 2004; Abreu y col, 2009*).

Finalmente, la agricultura intensiva practicada en la actualidad conserva algunas de las propiedades físico-químicas del suelo que le atribuyen calidad al mismo gracias a la aplicación de enmiendas orgánicas, que mantienen la MOS y algunos nutrientes disponibles para las plantas, entre otras condiciones favorables, aunque probablemente causa pérdidas importantes de nutrientes debido a su mayor concentración en el suelo (*Machado, 2005 y Toro, 2008; García, 2010*). Sin embargo, el efecto de la agricultura sobre las propiedades del suelo en el área de estudio solo se ha estudiado en base a comparaciones con un número muy bajo de parcelas, por lo que resulta difícil realizar una generalización de las tendencias encontradas.

En base a estos antecedentes y a las preguntas de investigación, nos planteamos las siguientes hipótesis de trabajo:

1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

La intensidad y duración de las diferentes transformaciones que ha sufrido el páramo natural, como son la agricultura triguera y el sistema de agricultura intensiva, deben haber causado cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que pueden haber afectado su calidad, por lo que será posible encontrar un conjunto de indicadores del estado del suelo y formular un índice de calidad.

En los suelos de páramo natural (PN), se espera encontrar valores altos de MOS y por tanto alta capacidad de retención de agua y altos contenidos de N total, elevadas capacidades de intercambio catiónico (CIC) por sus suelos más arcillosos y los valores de pH más ácidos. Respecto a la microbiota, se espera dominancia de microorganismos Oligotrofos por ser un ambiente estable. La materia orgánica del páramo se espera que sea más estable, por lo que los porcentajes de carbono respirado en relación al carbono total serán menores. Así mismo se espera la menor proporción de nitratos ya que el pH ácido debe inhibir el proceso de nitrificación.

En las laderas degradadas (LD) se espera encontrar los menores valores de MOS y nutrientes disponibles como consecuencia de la historia de explotación para la producción de trigo en la cual no se aplicaban enmiendas orgánicas ni minerales y los descansos del suelo eran muy cortos. Se esperan los menores valores de conductividad hidráulica, CC y PMP debido a las pérdidas de MOS. Además se deben presentar los valores más altos de densidad aparente y texturas más arenosas como consecuencia de la pérdida de la fracción fina del suelo.

En parcelas con agricultura intensiva (SA) se espera encontrar suelos con valores de pH cercanos a la neutralidad debido al encalado, que busca disminuir la acidez de estos suelos, bajos niveles de compactación y densidad aparente por la aplicación de pargana y el arado, lo que podría estar aumentando la conductividad hidráulica. Contenidos de MOS más lábil derivada de las enmiendas orgánicas de reciente aplicación, por lo que además se esperaría una mayor fertilidad. Respecto a la microbiología, se espera una dominancia de organismos copiotrofos, característicos de ambientes con alta disponibilidad de nutrientes y sustratos carbonados lábiles.

En las laderas retomadas (LR), donde se establece recientemente una agricultura intensiva sobre laderas trigueras degradadas, se espera encontrar propiedades intermedias entre suelos degradados y suelos con agricultura intensiva. Específicamente se deducen valores de MOS mayores que en LD por la aplicación de enmiendas orgánicas; y valores Estos suelos han de diferenciarse de aquellos con agricultura intensiva por el alto empobrecimiento de nutrientes que han sufrido, reflejándose en la baja CIC que deben poseer por las pérdidas sufridas de MOS. Es por esto que los altos aportes de materia orgánica que han obtenido las laderas retomadas podría resultar una buena estrategia de restauración del suelo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Analizar varias propiedades edáficas en suelos sometidos a diferentes historias de manejo y niveles de degradación y seleccionar algunas que sirvan como indicadores para formular un índice de calidad que permita diagnosticar el efecto de prácticas de manejo actuales y pasadas sobre la sustentabilidad de los sistemas de producción en suelos de páramo.

1.4.2 Específicos

1. Hacer un muestreo a escala regional, que abarque la parte alta del Valle del río Chama, para que los resultados obtenidos puedan permitir cierto grado de generalización y los índices puedan aplicarse a esta escala.
2. Evaluar un conjunto de propiedades edáficas de naturaleza física, química y biológica en suelos sometidos a diferentes historias de uso en el páramo andino venezolano.
3. Reconocer las variables más sensibles ante los cambios en el uso de la tierra, considerando el páramo natural como sistema de referencia y los demás tipos de suelo como usos alternativos que se le han dado en la historia.
4. Evaluar directamente la fertilidad del suelo mediante la siembra de maíz bajo condiciones controladas y relacionar sus tendencias con los indicadores medidos.
5. Identificar indicadores de degradación y de intervención.
6. Formular un índice de calidad edáfica que permita comparar sintéticamente lugares con diferentes niveles de degradación antrópica y que pueda ser utilizado como herramienta de diagnóstico de la condición integral de cada sitio.

El desarrollo de un índice de calidad del suelo como herramienta de diagnóstico puede resultar un fuerte apoyo para caracterizar el área de estudio, plantear proyectos de restauración, evaluar la sustentabilidad de los sistemas productivos, que se asocia con una máxima producción procurando la mínima erosión del suelo (*Bautista y col, 2004*) y en general establecer líneas bases y herramientas de monitoreo en proyectos agroecológicos o de restauración.

Cualquier proyecto de restauración debe comenzar indagando sobre el estado del suelo. Si este se ha degradado más allá de los umbrales abióticos se debe comenzar por recuperar su funcionalidad para así restablecer sus servicios ecosistémicos, posterior a esto se puede restaurar la estructura del ecosistema y la diversidad biológica original de la unidad ecológica. Además, es vital conocer los factores bióticos y abióticos que limitan la regeneración. Por esto se busca con el presente proyecto, conocer el estado de algunas propiedades físico – químicas y biológicas en suelos degradados de los páramos del Valle alto del Chama, ubicado en la cordillera de Mérida y compararlo con suelos cultivados en el mismo lugar y con el ecosistema natural aun presente bajo las mismas condiciones climáticas.

Además para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de producción, resulta importante la formulación de un índice de calidad del suelo que facilite el diagnóstico de las tierras, lo que a su vez ayudaría a darle un manejo adecuado al momento de hacerlas productivas mediante la siembra, por tanto un índice de calidad edáfica es considerado como una herramienta útil para conocer las condiciones del suelo y así evitar su agotamiento o sobre-saturación de nutrientes disponibles para la nutrición de las plantas y demás componentes del ecosistema.

2 METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se desarrolló en el Valle alto del Chama (Figura 1.1, Figura 2.1), dentro del Municipio Rangel, Estado Mérida; siendo Mucuchíes la capital y centro administrativo de este municipio, ubicado entre los 2500 y 3200 m de altitud. En el ámbito ecológico se ubica dentro de un bolsón seco, con precipitaciones totales anuales entre 600 y 800 mm año⁻¹, con una fuerte estacionalidad hídrica y valores relativamente altos de insolación (Monasterio, 1980). Se ha seleccionado los alrededores de Mucuchíes y la cuenca alta del río Chama para interpretar la dinámica en el uso de la tierra de los páramos venezolanos, debido a que esta zona fue uno de los principales centros de producción triguera desde la colonia y es actualmente un centro agrícola muy importante por su volumen de producción. Además es una zona donde se han realizado gran cantidad de investigaciones.

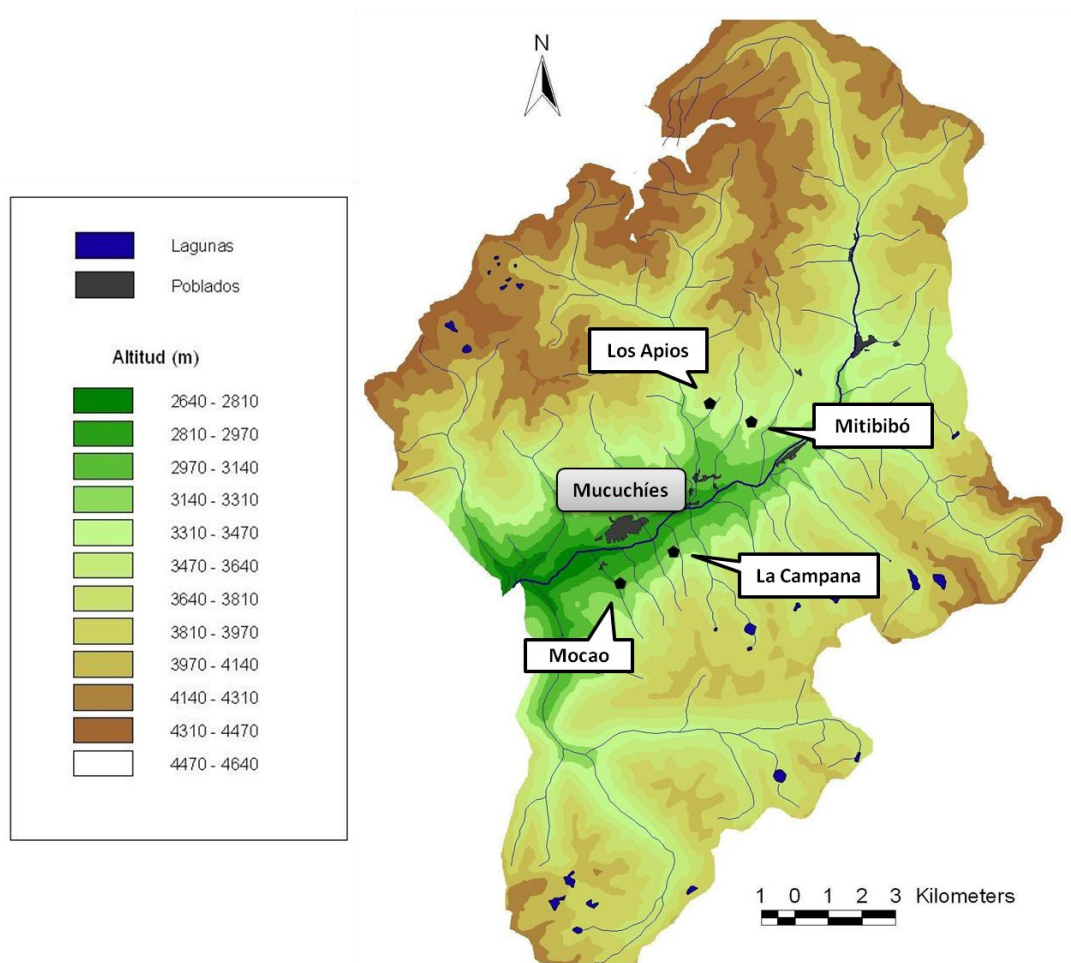


FIGURA 2.1. Mapa topográfico del valle alto del Chama, resaltando la localización de la ciudad de Mucuchíes, capital de municipio y las zonas de muestreo (Mocoa, La Campana, Mitibibó y Los Apios). Mérida – Venezuela.

2.2 DISEÑO DE MUESTREO

Ya que algunos de los objetivos de este trabajo fueron generar un Índice de Calidad del Suelo (ICS) e identificar indicadores de degradación y de intervención, se evaluaron algunas propiedades edáficas físicas, químicas y biológicas, que pudieran ser sensibles ante los diferentes procesos ocurridos en el suelo, reflejando su condición. Partiendo de esto, la unidad de muestreo se definió a escala agroecosistémica que según *Sarmiento y col. (2001)* se refiere a un ecosistema que recibió un manejo agrícola particular haciendo énfasis en el compartimiento suelo.

Los análisis realizados se enfocaron en el eje de variación: sistema de manejo, considerando diferentes grados de intensidad en las prácticas aplicadas, enfoque aplicado por varios autores (*Sarmiento y col, 2001; Rodríguez y col, 2009*). Se ubicaron los suelos en un gradiente de degradación, obteniendo condiciones edáficas de poca intervención y agotamiento por la alta explotación recibida, incluyendo prácticas agrícolas con varios niveles de intensidad; dicho gradiente reflejó condiciones contrastantes que resultaron de las transformaciones que han sufrido estos ecosistemas en la historia.

El diseño de muestreo, según lo planteado por *Rodríguez y col (2009)* consistió en la selección de diferentes situaciones de manejo del suelo (considerados tratamientos), que responden a un gradiente de degradación sucedido en la historia de los páramos andinos merideños. Los tratamientos incluidos, expuestos en el orden cronológico de aparición que tuvieron en el tiempo, son: Páramos naturales (PN), laderas degradadas (LD), suelos con agricultura intensiva (SA) y laderas retomadas con agricultura después de la degradación (LR).

En este gradiente los páramos naturales constituirían el tratamiento control o línea base para evaluar el efecto de los otros tres tratamientos o historias de uso. En cada situación se seleccionaron áreas de 10 x 10 m como unidad de muestreo. Para que el índice de calidad del suelo no se viera restringido a las condiciones particulares de la localidad seleccionada, se realizaron réplicas en diferentes sectores de la cuenca alta del río Chama; lo que llevó a la investigación a desarrollarse a escala regional considerando al índice aplicable a toda la parte alta del Valle. Así pues, se consideraron cuatro localidades o réplicas dispersas en el Valle alto del Chama, cada una con los cuatro sistemas de manejo o tratamientos seleccionados, como puede verse en la (Figura 2.2).

Al ubicar las réplicas de cada tratamiento en diferentes localidades (Figura 2.2), está incluida una variabilidad espacial a escala regional que nos permitió hacer generalizaciones de los resultados para la Cuenca alta del Río Chama. Sin embargo se intentó reducir la variabilidad entre réplicas de cada localidad, proveniente de la heterogeneidad ambiental característica de los páramos andinos; seleccionando series de tratamientos con condiciones similares de altitud, exposición y pendiente entre sí.

De esta manera se analizó cada historia de uso en condiciones de repetibilidad.

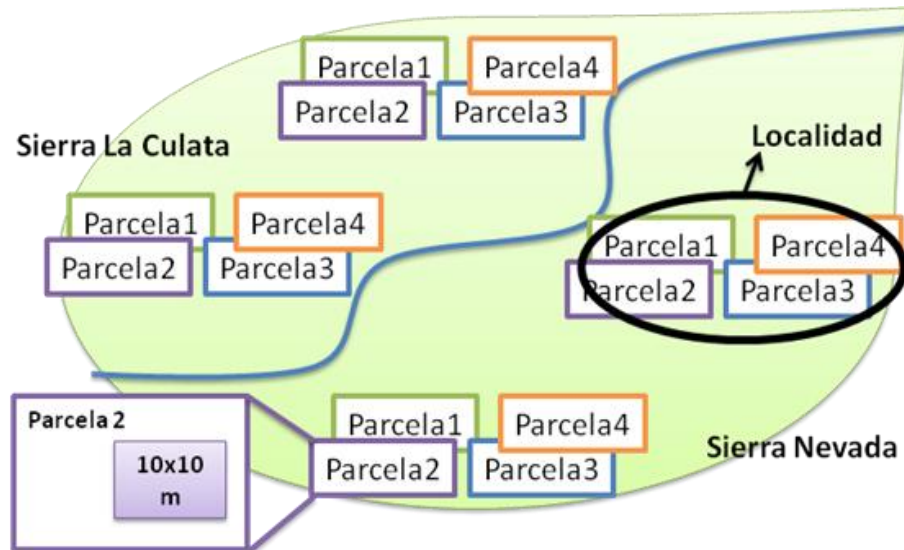


FIGURA 2.2. Esquema del diseño de muestreo, con cuatro historias de manejo (tratamientos) replicadas en cuatro sectores del valle alto del río Chama, para un total de 16 parcelas. Una unidad de muestreo de 10x10 m se ubicó en cada una de las parcelas.

2.2.1 Tratamientos o Historias de Uso

Páramos naturales (PN)

Ecosistema que conserva su vegetación natural y no ha sido intervenido directamente por el sistema triguero o con agricultura intensiva, aunque inevitablemente tendrá impacto humano, por pastoreo o extracción de biomasa. Muestran una vegetación heterogénea de rosetal – arbustal con dominancia de *Espeletia schultzei*, *Hypericum laricifolium*, *Baccharis prunifolia*, *Stevia lucida*, *Nassella mexicana*, *Pernettya prostrata* (Monasterio, 1980). Estos suelos fueron considerados como control, para luego comparar con los resultados obtenidos en los suelos manejados.

Laderas degradadas (LD)

Son áreas que fueron sobreexplotadas para la producción de trigo desde la época de la colonia y hasta mediados del siglo XX y luego abandonadas; actualmente muestran “sucesiones detenidas” en el tiempo, como consecuencia de la fuerte degradación que sufrieron. La vegetación, aunque es escasa, puede clasificarse como pajonales o arbustales degradados, con dominancia de la gramínea *Jarava ichu* y el arbusto *Stevia lucida* (Sarmiento y Smith, 2011).

Agricultura intensiva (SA)

Áreas que actualmente son utilizadas para la producción agrícola, reciben un manejo intensivo que se ha mantenido al menos durante 20 años, con prácticas como el arado, la fertilización orgánica y mineral y el encalado para controlar el pH; estos suelos no descansan entre las épocas de cultivo, pues las continuas entradas de enmiendas orgánicas y agroquímicos le suministran al suelo los nutrientes necesarios para permitir la producción agrícola, ocasionando una alta disponibilidad de nutrientes (*Felicien, 2009*). Han perdido su cobertura vegetal original y la estructura original del suelo. Esta agricultura en general se estableció sobre áreas no degradadas por el cultivo de trigo.

Laderas retomadas con agricultura (LR)

Son laderas que fueron degradadas por el sistema triguero y debido a la necesidad de tierras agrícolas, han sido utilizadas en años recientes para la agricultura intensiva mediante el uso de algunas prácticas que le permiten al suelo ser productivo nuevamente, como el arado y la incorporación de materia orgánica como fertilizante orgánico.

2.2.2 Preselección de los suelos muestreados

Mediante el uso de mapas y fotografías panorámicas del Valle alto del Chama (Figura 2.3 - Figura 2.8) procedentes de la base de datos del ICAE manejadas por la Geog. Julia Smith, se realizó una preselección de las áreas a muestrear. Se buscaron áreas donde se pudieran encontrar los diferentes tratamientos descritos arriba (PN, LD, SA y LR) adyacentes unos con otros, en lo posible ubicados dentro de la misma ladera, buscando condiciones similares de exposición, pendiente y altitud, para disminuir los efectos de la variabilidad ambiental. Con este fin se revisaron fotos de todo el valle alto del Chama y se preseleccionaron varios posibles sitios.

Se identificaron los tratamientos usando fotografías panorámicas de años diferentes. Los PN, SA y LD fueron reconocidos al comparar fotos del 2001 y de años más actuales (2009 – 2011) por mantenerse en la misma condición. En el caso de las LR, se reconocieron por aparecer como LD en las fotos del 2001 y como SA en las fotos más actuales (Figura 2.3 - Figura 2.8) buscando tener parcelas que al menos tengan 5 años de haber sido retomadas con agricultura.

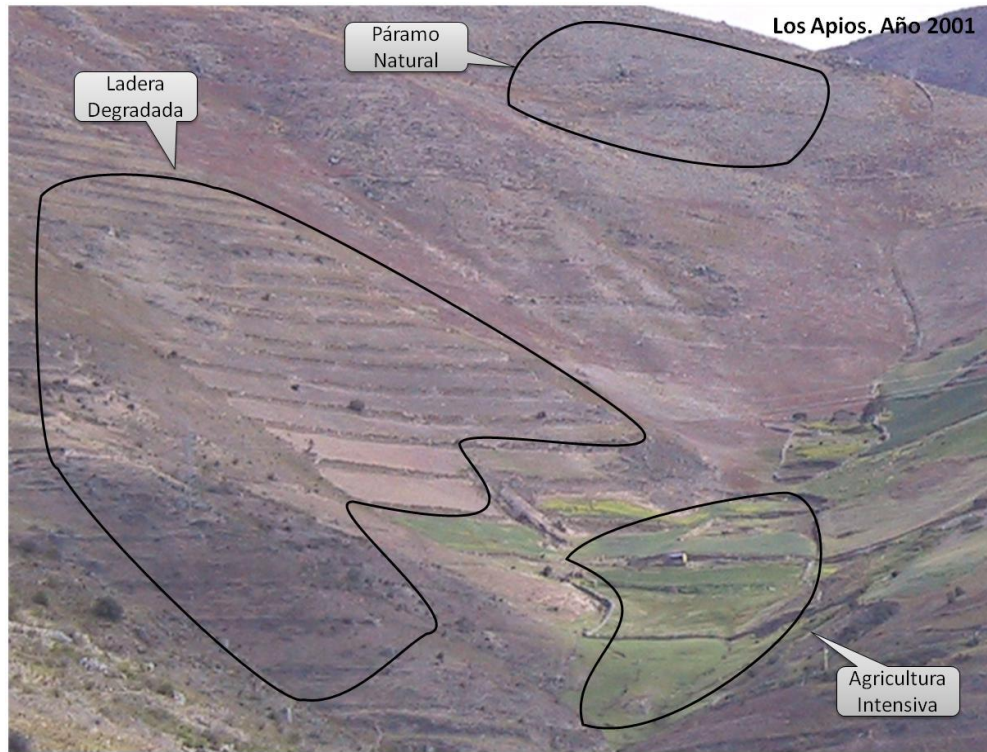


FIGURA 2.3. Foto panorámica de la localidad Los Apios. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.

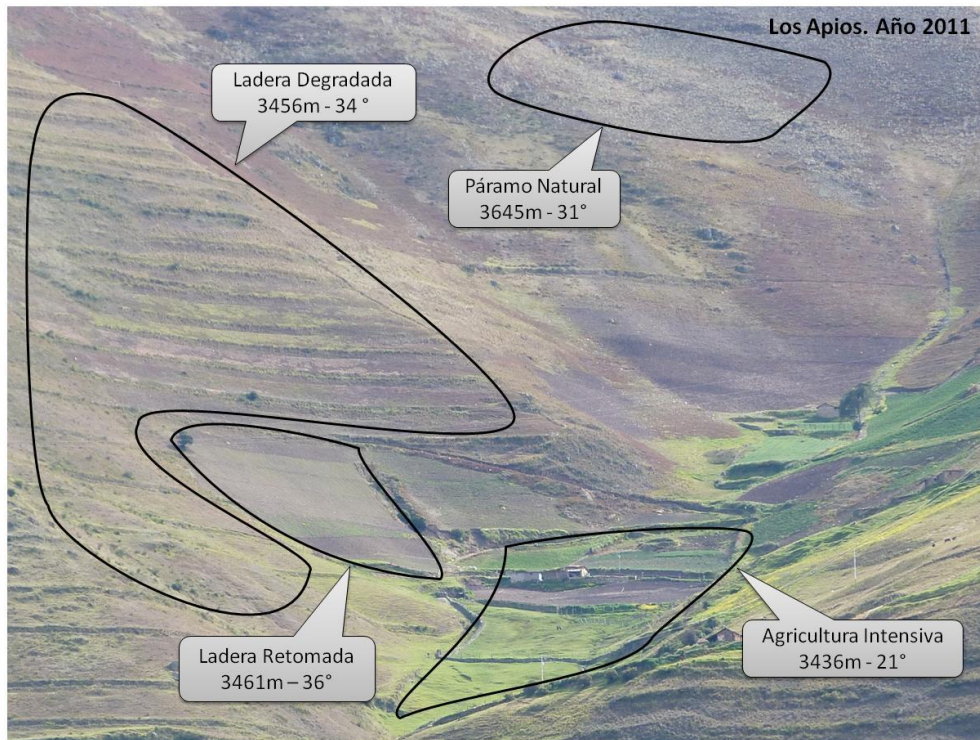


FIGURA 2.4. Foto panorámica de la localidad Los Apios. Año: 2011. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.

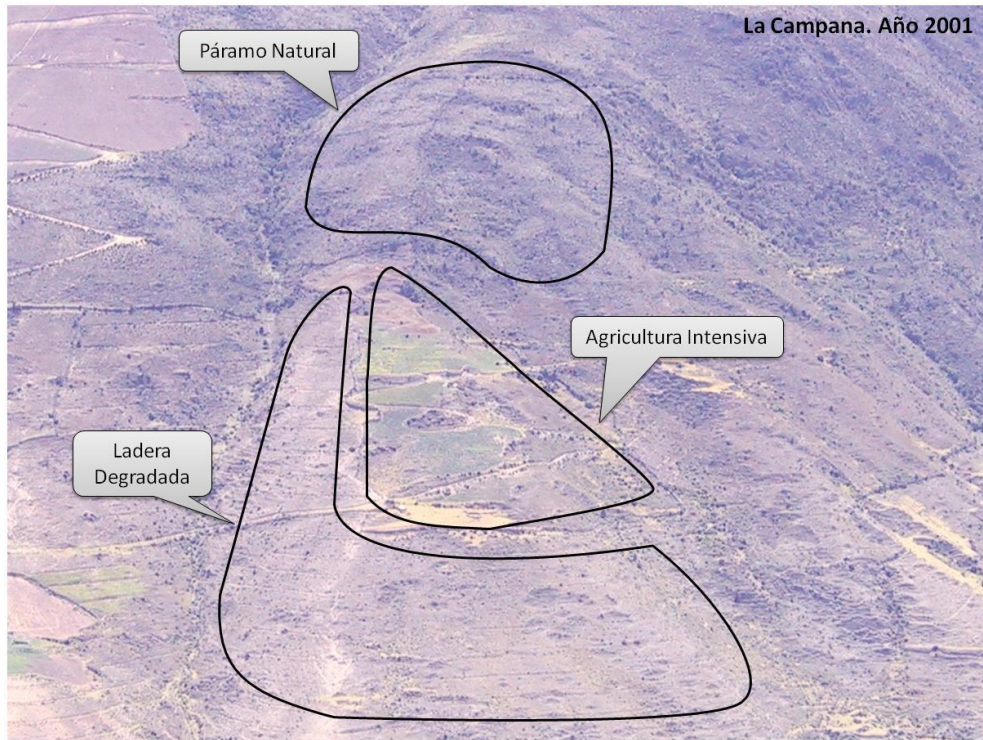


FIGURA 2.5. Foto panorámica de la localidad La Campana. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.

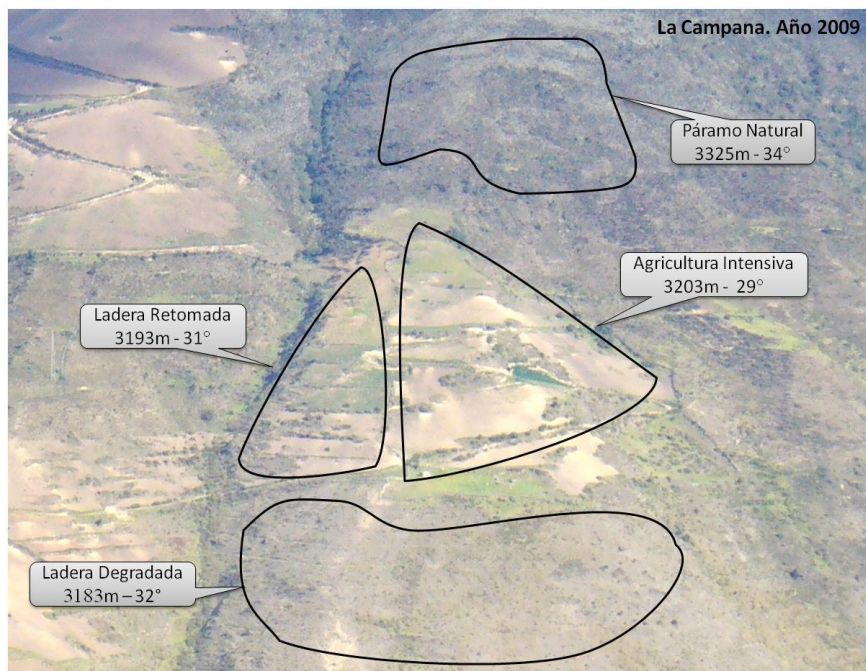


FIGURA 2.6. Localidad la campana. Año: 2009. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.

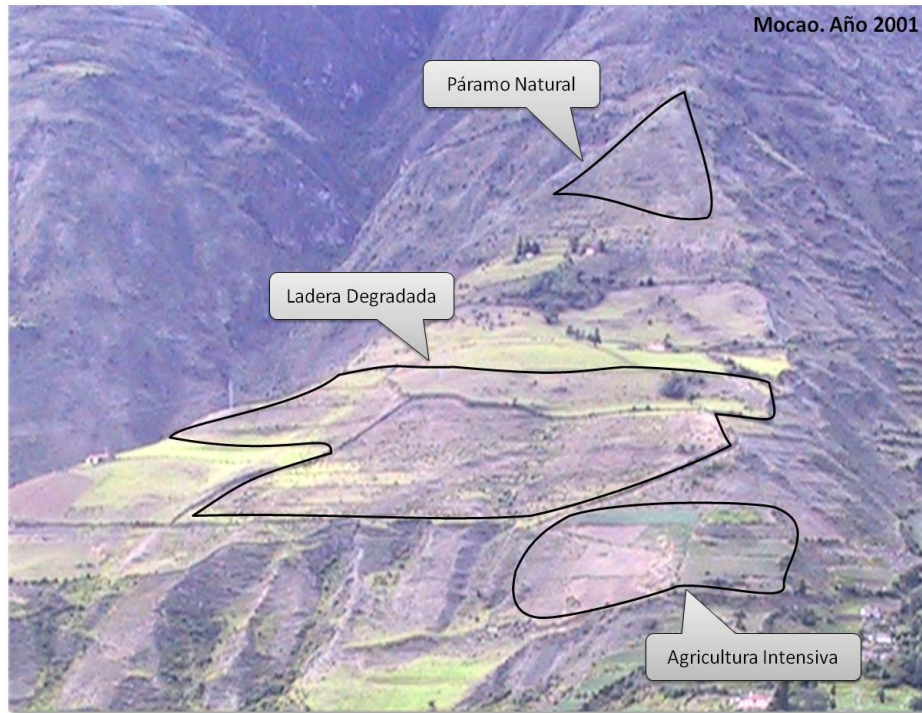


FIGURA 2.7. Localidad Mocoa. Año: 2001. Resaltados los tratamientos o historias de uso.

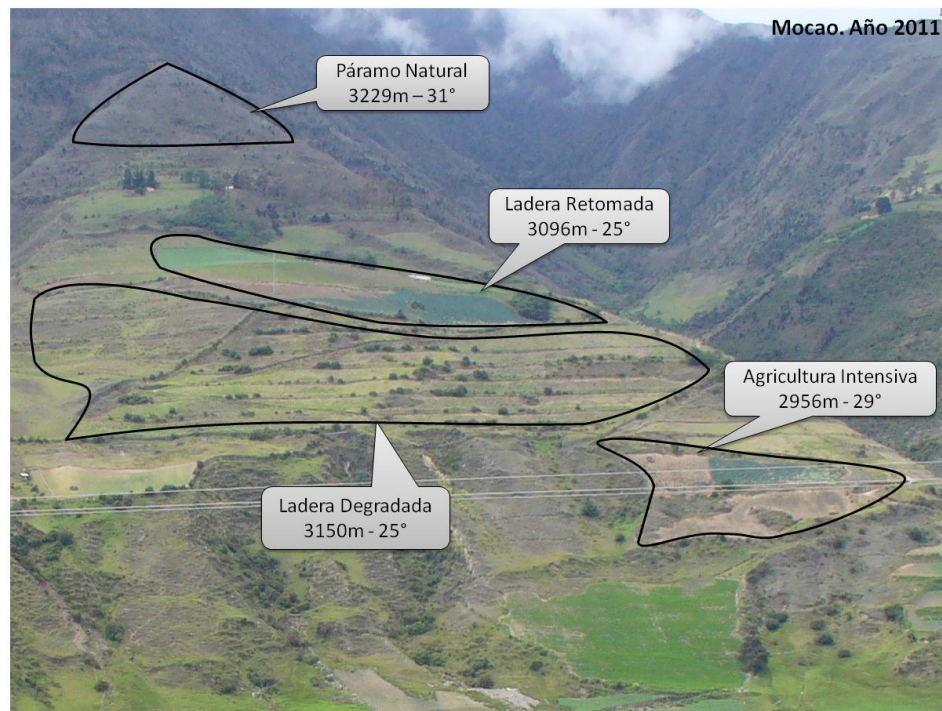


FIGURA 2.8. Localidad Mocoa. Año: 2011. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y pendiente respectiva.

2.2.3 Salida de reconocimiento

Una vez preseleccionadas las áreas de muestreo, se procedió a realizar la primera salida de campo, para verificar mediante la observación directa, la presencia de los distintos tratamientos ubicados en las fotografías panorámicas. La información provista por las fotos se confirmó en campo entrevistando a los dueños o trabajadores de las parcelas a muestrear, confirmando el tiempo de retoma de LR, el tiempo de producción de SA y el tiempo de abandono de LD. Se hizo una clara distinción entre SA y LR; los primeros manejados con el mismo sistema por más de 20 años consecutivos y los segundos, suelos que luego de haber sido abandonados y clasificados como LD, fueron cultivados nuevamente desde hace por lo menos 5 años.

Para la localidad Mitibibó no se tenían fotos, pero en campo se lograron reconocer los cuatro tratamientos requeridos para el muestreo, además de confirmar la historia de cada parcela por comunicación personal con el Sr. Eliodoro, oriundo de la zona (Figura 2.9).



FIGURA 2.9. Localidad Mitibibó. Año: 2012. Resaltados los tratamientos o historias de uso, con su altitud y su pendiente respectiva.

2.2.4 Áreas y parcelas seleccionadas

Finalmente, las localidades seleccionadas fueron, Los Apios y Mitibibó en la Sierra de La Culata y La Campana y Mocoa en la Sierra Nevada de Mérida como puede observarse en la Figura 2.10 y Tabla 2.1, donde también se especificó la ubicación de cada tratamiento. Estas cuatro localidades cumplían con los criterios de presentar los cuatro tratamientos en relativamente buena situación de repetibilidad y además estar en cuatro sectores más o menos distantes entre sí, para desarrollar el objetivo de muestrear a escala regional. La caracterización de cada una de las parcelas seleccionadas se muestra en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1. Localización en coordenadas UTM, altitud, pendiente y orientación de las 16 parcelas seleccionadas y código asignado.

Código	Localidad	Tratamiento	X	Y	Altitud (msnm)	Pendiente	Orientación
MIPN	Mitibibó	Páramo Natural	293062	971719	3518	27°	300° NO
MISA	Mitibibó	Suelo Agrícola	293121	971781	3520	26°	300° NO
MILD	Mitibibó	Ladera Degradada	292622	971052	3362	32°	290° NO-O
MILR	Mitibibó	Ladera Retomada	292444	970739	3308	34°	290° NO-O
APPN	Apios	Páramo Natural	291842	971992	3645	31°	180° S
APSA	Apios	Suelo Agrícola	291480	971559	3456	34°	160° S-SE
APLD	Apios	Ladera Degradada	291499	971583	3461	36°	160 S-SE
APLR	Apios	Ladera Retomada	291636	971564	3436	21°	230° O-SO
CPPN	Campana	Páramo Natural	290496	967108	3325	34°	0° N
CPSA	Campana	Suelo Agrícola	290517	967417	3203	29°	340° N-NO
CPLD	Campana	Ladera Degradada	290523	967484	3183	32°	30° N-NE
CPLR	Campana	Ladera Retomada	290555	967459	3193	31°	30° N-NE
MOPN	Mocao	Páramo Natural	289277	966271	3229	31°	340° N-NO
MOSA	Mocao	Suelo Agrícola	288693	966618	2956	29°	20° N-NE
MOLD	Mocao	Ladera Degradada	289227	966409	3150	25°	340° N-NO
MOLR	Mocao	Ladera Retomada	288983	966411	3096	25°	320° N-NO

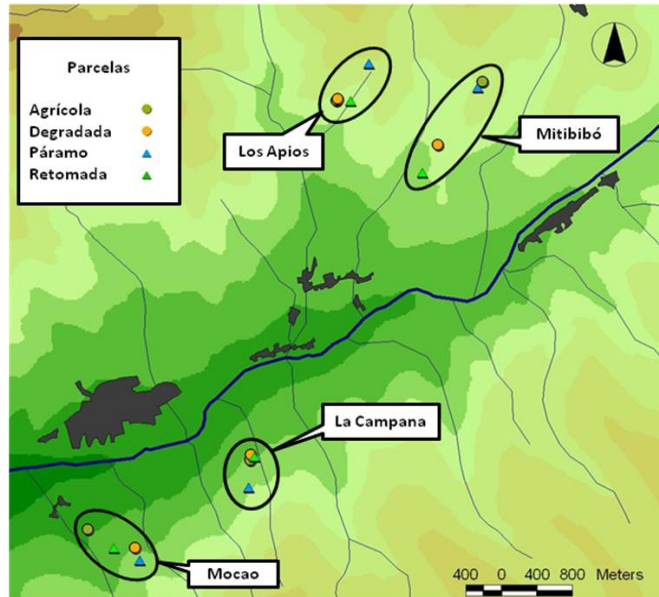


FIGURA 2.10. Mapa topográfico del área de estudio mostrando la ubicación de las parcelas seleccionadas en cada localidad para el muestreo de los suelos, los tonos de verde indican diferentes niveles altitudinales. Cuenca alta del río Chama, Mérida - Venezuela.

2.3 MUESTREO DE LOS SUELOS

2.3.1 Caracterización de las parcelas de muestreo

En cada una de las 16 parcelas seleccionadas se estableció, de forma aleatoria, una unidad de muestreo de 10x10 m. Se utilizó una ficha de campo (FIGURA 2.11) para recolectar algunos datos como: altitud, pendiente, ubicación en coordenadas UTM tomadas con un GPS (Garmin, CS76), orientación y observaciones adicionales de vegetación dominante, características del suelo y aridez del lugar.

Fecha de Muestreo:	
Localidad:	
Tipo de suelo:	N° bolsa:
Coordenadas (utm):	Altitud (m):
Pendiente (grados):	Orientación:
Observaciones:	

FIGURA 2.11. Ficha de campo empleada (tomada y modificada de Guitian y Carballas, 1976).

2.3.2 Recolección de las muestras de suelo

En cada parcela se tomó una muestra compuesta, mezclando el suelo colectado en 10 puntos aleatorios entre 0-10 cm de profundidad, para completar un total de 15 – 20 Kg aproximadamente; se utilizaron bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad de la muestra. La selección de los puntos de colecta se realizó con el conteo de pasos caminados a lo largo (eje X) y ancho (eje Y) de la parcela según los valores arrojados por una tabla de números aleatorios.

Para la determinación de algunas variables como la densidad aparente (D_b), la conductividad hidráulica saturada (CH) y el contenido de agua gravimétrica y volumétrica en saturación (Q y W), se colectaron muestras de suelo con su estructura intacta. Para esto se utilizaron cilindros de metal (10 cm de altura x 6 cm de diámetro) que fueron enterrados al ras del suelo utilizando una porra como puede observarse en la Figura 2.12; una vez desenterrado el cilindro se cerró inmediatamente con papel plástico procurando mantener el estado de la muestra lo menos alterado posible. Se tomaron 5 réplicas (cilindros) por cada unidad de muestreo, las cuales se seleccionaron aleatoriamente con el método anteriormente explicado.



FIGURA 2.12. Recolección de muestras de suelo no alterado utilizando cilindros metálicos.

2.4 PROCESAMIENTO DE LOS SUELOS EN EL LABORATORIO

2.4.1 Distribución de la muestra de suelo

Una vez en el laboratorio, se fraccionó la muestra de suelo compuesta tomada en campo, y se procedió a prepararla según las determinaciones a realizar. En la Figura 2.13 puede observarse la cantidad de suelo destinada a cada laboratorio y las determinaciones a realizar en cada uno, además de las preparaciones previas que recibieron dichas muestras.

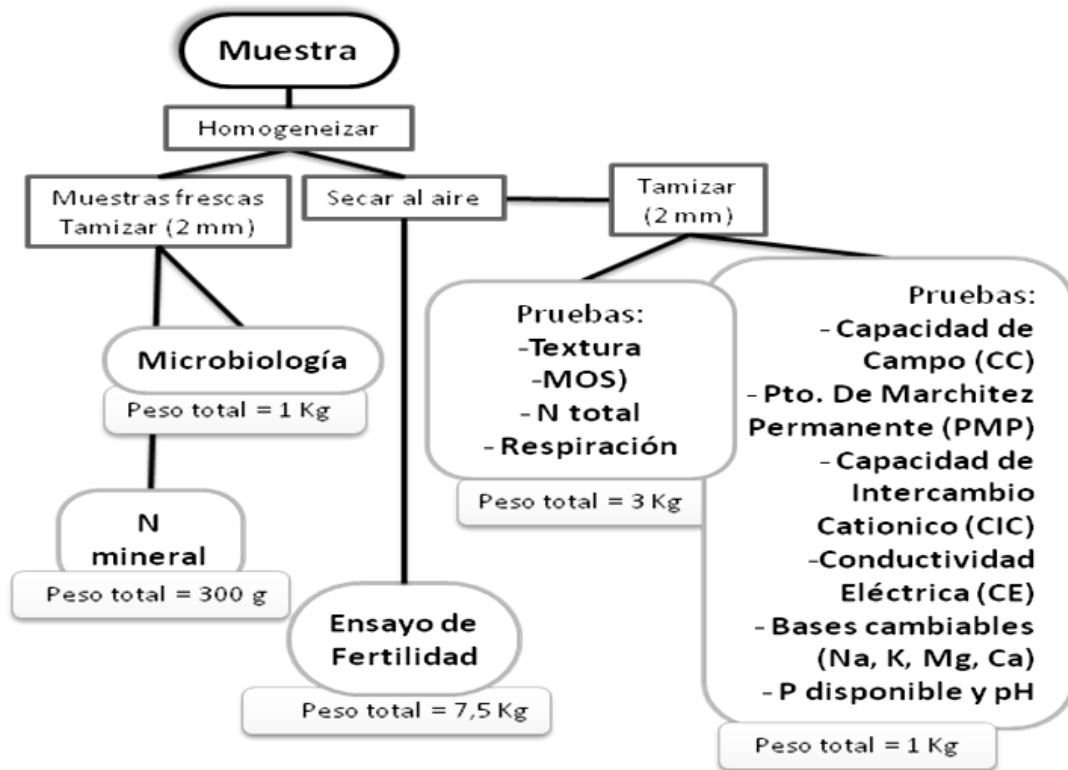


FIGURA 2.13. Esquema que indica la repartición de la muestra de suelo proveniente del campo para la determinación de las diferentes pruebas en el laboratorio, se indican los procedimientos de preparación del suelo previo al laboratorio, así como la cantidad de suelo apartado para cada determinación.

2.4.2 Preparación previa de los suelos (Manual Lab. Pedología)

Homogeneización: se realizó a mano por el método de cuarteo, luego la muestra fue almacenada en una bolsa plástica para conservar la humedad del suelo, con su respectiva etiqueta en una nevera a 4°C.

Tamizado: la muestra se tamizó manualmente a 2 mm. La porción o fracción que no pasó por el tamiz se colocó sobre el mesón, donde se desmenuzaron los agregados con un rodillo, cuidando de no romper las partículas de roca, para pasarlo de nuevo por el tamiz. Se repitió la operación las veces necesarias para agotar las partículas de agregados restantes en el tamiz.

Secado: se extendió la muestra sobre papel periódico, se dejó secar por varias semanas al aire libre, dentro del laboratorio (en un ambiente seco). En la Figura 2.14 se muestran cada una de las 16 muestras de suelos, homogeneizadas, secadas y tamizadas.

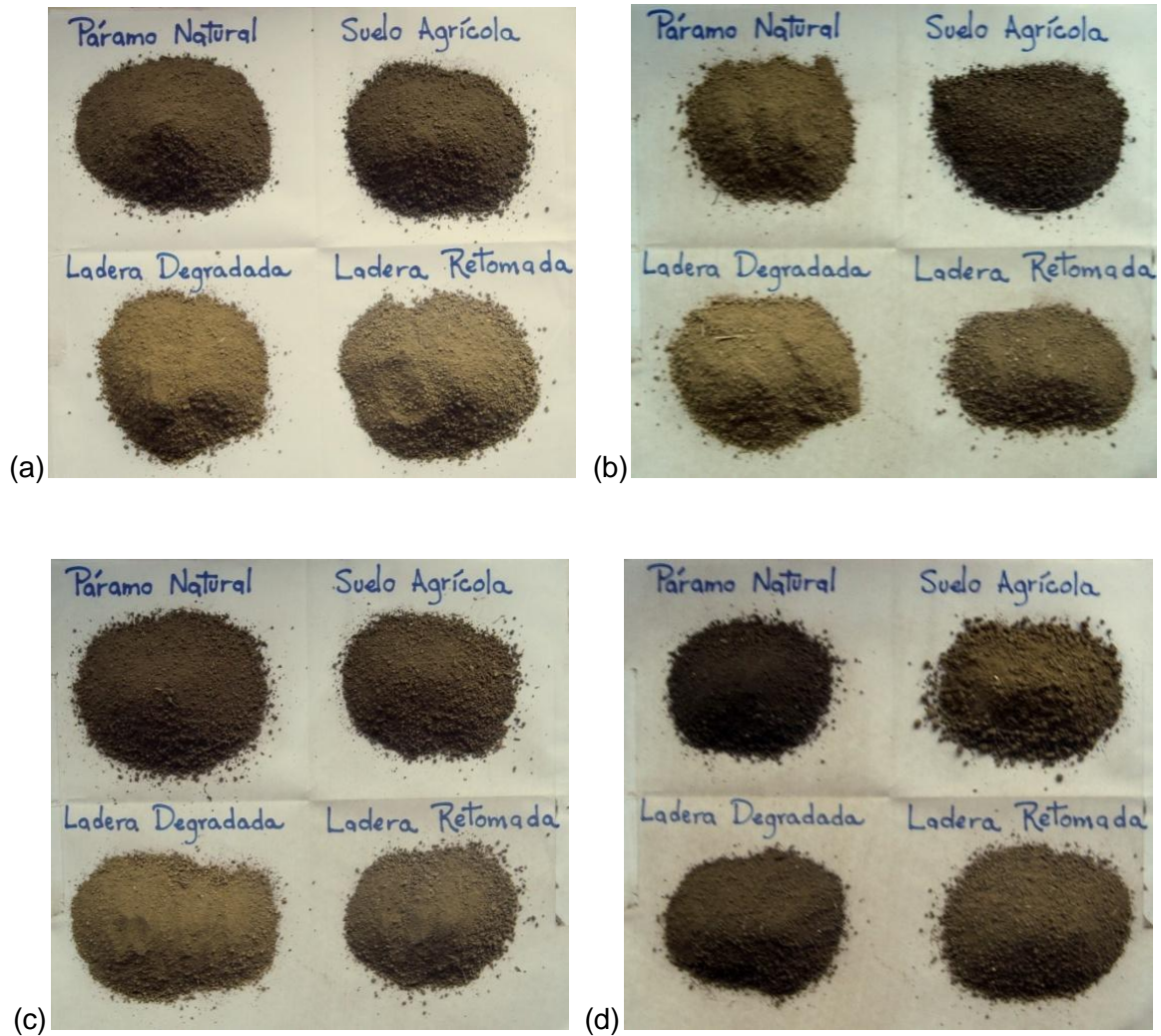


FIGURA 2.14. Documentación fotográfica de los suelos homogeneizados, tamizados a 2 mm y secados al aire. Nótese la diferencia de color entre los tratamientos: (a) localidad Mitibibó, (b) localidad Los Apios, (c) localidad La Campana y (d) localidad Mocoa.

2.4.3 Atributos determinados

Ya que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo; algunos autores (Abreu y col, 2009; Bautista y col, 2004; Cantú y col, 2007; García, 2010; Gonzales, 2004; Marinari y col, 2006; y Schipper y Sparling, 2000), plantean un conjunto mínimo de propiedades que pueden ser usadas como indicadores y así evaluar los cambios ocurridos con respecto al tiempo. Sin embargo, este set varía para cada localidad y caso de estudio. En este trabajo se seleccionó el grupo de atributos, físicos, químicos y biológicos, mostrados en la Tabla 2.2, utilizando como criterio que fuera posible medirlos en los laboratorios de la ULA a los que teníamos acceso, que fueran fáciles de medir, poco costosos y que además fueran indicadores de diferentes ciclos y procesos edáficos.

TABLA 2.2. Propiedades edáficas, físicas, químicas y biológicas seleccionadas y los métodos utilizados en el laboratorio para su determinación.

Propiedades		Método de Medición
Propiedades Físicas		
Textura		Método de Boyoucos (<i>Guitian y Carballas, 1976</i>).
Capacidad de campo (CC)		Método de la Olla de Presión (<i>Manual Lab. Pedología, sin año</i>).
Punto de Marchitez Permanente (PMP)		
Contenido de Agua en Saturación (W agua gravimétrica y Q agua volumétrica)		Método Gravimétrico (<i>Guitian y Carballas, 1976</i>)
Conductividad hidráulica (CH)		Determinación Conductométrica (<i>Guitian y Carballas, 1976</i>)
Densidad Aparente (Db)		Método del Cilindro (<i>Guitian y Carballas, 1976</i>).
Fracción Gruesa del Suelo (FG)		Diferencia Volumétrica del material tamizado
Propiedades Químicas		
Cantidad de MOS		Pérdida de Peso por Ignición (<i>Schulte, 1995</i>).
Conductividad Eléctrica (CE)		Conductometría (<i>Com. Per. Prof Cliford Peña</i>)
pH		Potenciometría (<i>Guitian y Carballas, 1976</i>).
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)		Extracción con KCl (1n con pH=2,5) (<i>Manual Lab. Pedología, sin año</i>).
Contenido de Bases cambiables (Ca, Mg, Na, K)		Extracción con Acetato de Amonio (1n con pH=7) (<i>Manual Lab. Pedología, sin año</i>).
Fósforo disponible (P disp)		Método de Extracción Kurt –Bray (<i>Manual Lab. Pedología, sin año</i>).
Nitrógeno	Total (Nt)	Método de Kjeldahl (<i>Manual Lab. Ecología Vegetal, sin año</i>).
	Mineral (Nm)	Extracción, Destilación y Titulación (<i>Manual Lab. Ecología Vegetal, sin año</i>).
Propiedades Biológicas		
Respiración (Resp)		Incubación con Trampas de NaOH (<i>Nielsen y Winding, 2002</i>).
Bacterias Heterótrofas (BHT)		Placas de Microtitulación y Método del Número Más Probable (<i>Fuentes y Massol-Deyá, 2002; Diz-Cid, 2003; Gonzales, 2004 y García, 2010</i>).
Relación Oligotrofos / Copiotrofos		
Población de Proteolíticos (Prot)		
Población de Celulolíticos (Cel)		Incubación con Papel de Filtro y Método del Número Más Probable (<i>Fuentes y Massol-Deyá, 2002; Diz-Cid, 2003; Gonzales, 2004 Y García, 2010</i>)
Ensayo de Fertilidad (BM biomasa del maíz)		Siembra y Cosecha de Maíz en condiciones controladas

2.4.3.1 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

2.4.3.1.1 TEXTURA

Se determinó por el Método de Boyoucos. Con 100 ml de hexametafostato de sodio (50 g/l) en 50 g de suelo se dispersaron los agregados, durante 15 – 20 horas de reposo. Se agitó la muestra en una licuadora (Soil Dispersion Mixer) y se trasvasó a un cilindro graduado, donde se enrazó con agua hasta alcanzar 1 L de volumen. Se agitó fuertemente con un embolo y se midió con un hidrómetro (Gilson Company inc. Model N°SA-1) la densidad de la suspensión en diferentes tiempos: a los 40 s, la fracción gruesa (0,05 mm de diámetro); a las 5 h la fracción fina (0,002 mm) (Figura 2.15). La temperatura ideal del experimento es 20°C por tanto fue necesario hacer una corrección mediante la ecuación:

$$\text{Corrección} \quad T = \text{lectura (g/L)} + (0,36 * (T1-20))$$

El contenido de cada fracción se obtuvo mediante las ecuaciones:

$$\text{Arena} = 100 - (\text{Lectura 40 s} - \text{Lectura 40 s del blanco}) * 100 / \text{Peso Suelo}$$

$$\text{Arcilla} = (\text{Lectura 5 h} - \text{Lectura 5 h del blanco}) * 100 / \text{Peso Suelo}$$

$$\text{Limo} = 100 - \text{arena} - \text{limo}$$

El peso del suelo se corrigió con el Contenido Relativo de Humedad (CRH):

$$\text{Peso Corregido} = \text{Peso Suelo} / (1 + (\text{CRH}/100))$$

$$\text{CRH} = (\text{Peso Húmedo Suelo} - \text{Peso Seco Suelo}) * 100 / \text{Peso Seco Suelo}$$

La unidad de medición es gravedad específica (1GS = 1000 g/L) (Guitian y Carballas, 1976). Se hicieron 3 réplicas analíticas por cada muestra de suelo.

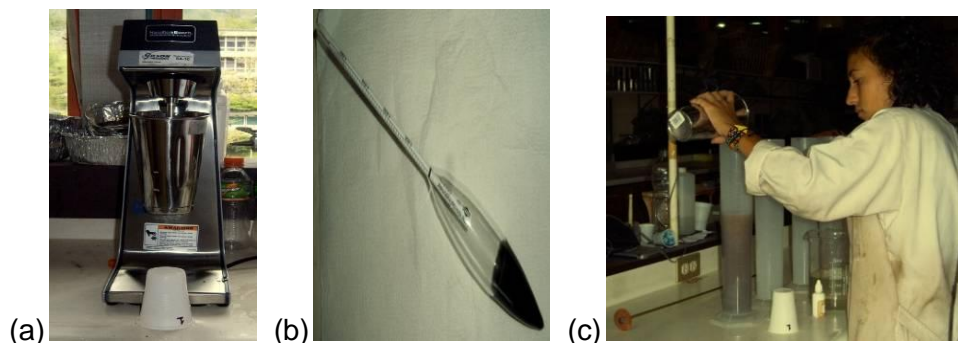


FIGURA 2.15. (a) Licuadora para dispersar suelo “soil dispersión mixer” (b) hidrómetro digital (Gilson company inc. model N°SA-1) (c) cilindros de 1 l con la muestra de suelo.

2.4.3.1.2 CAPACIDAD DE CAMPO (CC) Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP)

El método empleado para esta determinación fue la olla de presión (*Manual Lab. Pedología, sin año*). Se saturaron las muestras con agua, para llevarlas a la olla de presión, donde se le aplicaron diferentes presiones (CC: 1/3 atm; PMP: 15 atm). Se hizo una réplica analítica por cada muestra de suelo para esta determinación. Se calculó el contenido de agua (humedad relativa) expresado en *porcentaje*, para cada presión mediante la ecuación:

$$\%RH = [(Peso\ Húmedo - Peso\ Seco) / Peso\ Seco] * 100$$

2.4.3.1.3 CONTENIDO GRAVIMÉTRICO Y VOLUMÉTRICO DE AGUA EN SATURACIÓN (W Y Q)

Se determinó con los cilindros colectados en campo. Las muestras fueron saturadas por ascenso capilar desde su base, para esto se prepararon con un tul fino en su parte inferior sostenido con una liga para evitar pérdidas de suelo, se colocaron en un recipiente con agua sobre un soporte para mantenerlos separados del fondo y allí se dejaron por varias semanas hasta observar la superficie de la muestra húmeda (suelo saturado), se pesaron después de percolada el agua sobrante para obtener el peso húmedo, se llevaron a la estufa a 105 °C por 24 horas y se pesaron nuevamente obteniendo el peso seco (Figura 2.16). Tales contenidos de agua se expresaron en *porcentaje* (%), lo que equivale a g o cm³ por 100 g de suelo (para W y Q respectivamente) (*Guitian y Carballas, 1976 y Rodríguez, 2010*). Se realizaron 3 réplicas analíticas para cada uno de los 5 cilindros tomados en campo por parcela, obteniendo un total de 15 réplicas analíticas para cada parcela. El contenido de agua aravimétrica en saturación (W) incluye el agua gravitacional y el agua que se encuentra llenando en los poros más pequeños, retenida por fuerzas mayores a la gravedad, calculada mediante la ecuación:

$$W = \%RH = [(Peso\ Húmedo - Peso\ Seco) / Peso\ Seco] * 100$$

Partiendo de W se calculó el *Contenido de Agua Volumétrica en Saturación* (Q), con la ecuación:

$$Q = W * \text{densidad aparente}$$

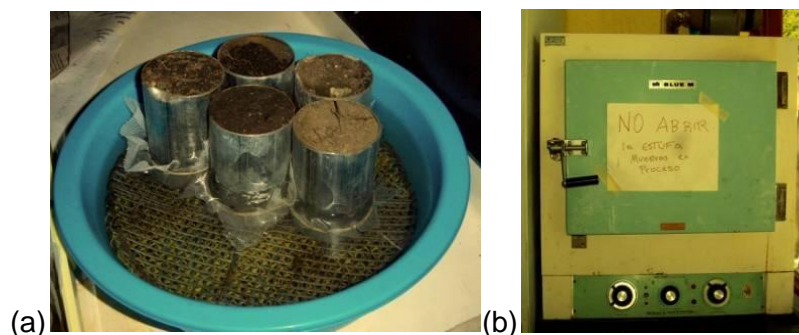


FIGURA 2.16. (a) Muestras de suelo intactas en los cilindros, puestos a saturar con agua por ascenso capilar y (b) Estufa utilizada para secar el suelo a 105 °C.

2.4.3.1.4 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SATURACIÓN

Se utilizó el método de determinación conductométrica también llamado permeámetro de carga constante (Guitian y Carballas, 1976), que consistió en medir el agua percolada a través de una muestra de suelo cilíndrica sobre la que se mantiene un nivel de agua constante, cuando la velocidad de percolación también es constante. Para esto, la muestra intacta de suelo saturada con agua, se expuso a percolación para determinar el volumen de agua que sale de la muestra; fue necesario mantener una lámina de agua de altura constante sobre la superficie del suelo durante el experimento (Figura 2.17). El coeficiente de conductividad hidráulica (k) se expresa en $cm^3 s^{-1}$ y se calculó mediante la ecuación:

$$k = l * v / a * h$$

Donde, l = longitud de la columna de suelo (cm); v = volumen de agua percolada ($cm^3 s^{-1}$) cuando se tiene un valor constante; a = área de la sección transversal del suelo (cm^2); h = altura de la lámina de agua sobre la muestra (cm). Se realizaron 3 réplicas analíticas por cada cilindro, con 5 cilindros por cada unidad de muestreo, para un total de 15 réplicas analíticas por cada muestra de suelo.



FIGURA 2.17. Dispositivo utilizado para la prueba de conductividad hidráulica, el cual incluye una estructura de madera con los cilindros apoyados sobre embudos, sobre los cilindros se pegaron vasos para mantener el volumen de agua y se utilizaron envases plásticos para la colecta del agua percolada.

2.4.3.1.5 DENSIDAD APARENTE Y FRACCIÓN GRUESA DEL SUELO

Evaluada por el método del cilindro. Para esto se tomaron las muestras recolectadas en cilindros metálicos (de 10 cm de altura y 6 cm de diámetro) que mantienen el suelo con su estructura original, la relación masa/volumen se evaluó según la ecuación:

$$Db = PS \text{ suelo} / \text{Volumen cilindro}$$

El peso seco (PS) se determinó después de dejar la muestra en una estufa a 105°C por 24 h. Se expresa en g/cm³ (Guitian y Carballas, 1976). Una vez secada y pesada la muestra, se tamizó el suelo a 2 mm, conservando ambas fracciones (fina y gruesa). A partir de esto se determinaron otras densidades (Tabla 2.3). El volumen de la fracción gruesa se determinó por diferencia de volumen de agua en un cilindro graduado una vez agregada la grava en el mismo. El volumen de la fracción fina se calculó por diferencia (V. Fracción fina = V. Cilindro – V. Fracción gruesa).

TABLA 2.3. Diferentes mediciones de densidad realizadas utilizando los cilindros con muestras de suelo intactas (PS=peso seco del suelo, V=volumen).

Densidad	Ecuación
Densidad de la fracción fina (Df).	$Df = \frac{PS. \text{fracción} < 2mm}{V. \text{fracción} < 2mm}$
Cantidad de fracción fina de suelo por unidad de volumen (Da)	$Da = \frac{PS. \text{fracción} < 2mm}{V. \text{Cilindro}}$
Densidad de la roca (fracción gruesa del suelo). (DG)	$DG = \frac{PS. \text{fracción} > 2mm}{V. \text{fracción} > 2mm}$
Porcentaje de la fracción gruesa de suelo. (%FG)	$\%FG = \frac{(PS. \text{fracción} > 2mm) * 100}{PS}$

2.4.3.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS

2.4.3.2.1 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (MOS)

El método empleado fue el de la pérdida de peso por ignición (Schulte, 1995), donde se pesaron 5 g de suelo seco y tamizado (0,001 mm) antes y después de pasar por una mufla (Figura 2.18) (Felisa[®] modelo: fe-340) a 360 °C por 2 horas. Se hicieron dos réplicas analíticas. Este método tiene algunas limitaciones respecto a su precisión, ya que difícilmente puede descartar la volatilización de algunas sustancias no orgánicas como el agua, el CO₂, el OH estructural, entre otras. El contenido de MOS se determinó mediante la ecuación:

$$\%MOS = [(Peso \text{ a } 105 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{Peso a } 360 \text{ } ^\circ\text{C}) / \text{Peso a } 105 \text{ } ^\circ\text{C}] * 100$$

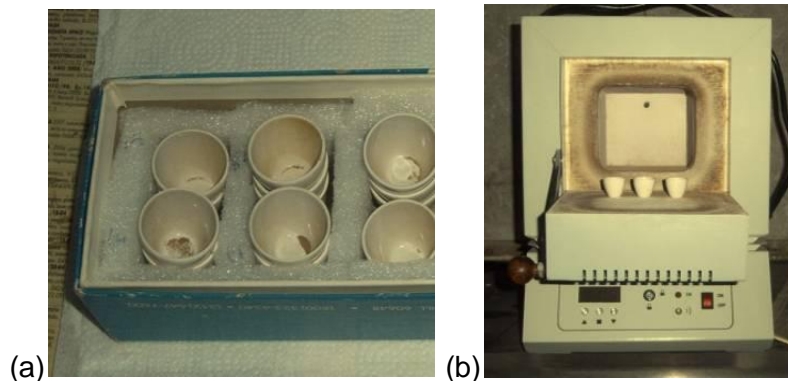


FIGURA 2.18. (a) Crisoles de porcelana para colocar las muestras de suelo, (b) Mufla, para la ignición de la materia orgánica.

2.4.3.2.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

El método consiste en preparar una suspensión de suelo y agua destilada en una relación 1:2, utilizando 20 g de suelo seco. Dicha suspensión fue agitada por 10 min, luego se dejó reposar durante 1 hora y se determinó la conductividad del líquido sobrenadante con un conductímetro (modelo CON510 Bench Conductivity, TDS meter. Oaklon). La unidad es mS cm^{-1} (S: siemens) (*com per prof. Clifford Peña*).

2.4.3.2.3 PH EN AGUA

Se determinó por potenciometría. El procedimiento consistió en preparar una solución 1:2,5 suelo-agua a la que se le introdujo un electrodo de vidrio que determinó el valor de acidez de la muestra (*Guitian y Carballas, 1976*).

2.4.3.2.4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

El método de determinación fue por extracción con KCl (1N a pH=2,5). Residió en la medición de las cargas negativas presentes por unidad de peso de suelo, basándose en la propiedad de los suelos, de que al ser lavados con una solución salina absorben el catión de la sal percolada y liberan una cantidad equivalente de otros cationes que están presentes en el complejo. Para esto se sometió a lixiviado con acetato de amonio (1N; pH 7) una muestra de suelo (4 g) hasta tener 100 ml (procedimiento realizado para determinar también el contenido de bases cambiables). Se hace la lectura de cada elemento en el aparato de absorción atómica y luego se lava la muestra con alcohol al 80% hasta eliminar el amonio en exceso. Posterior a esto, se lava la muestra con KCl hasta que lo indique el reactivo Nessler (dicho reactivo detecta pequeñas cantidades de amonio). Se afora la muestra, anotando los ml presentes en la fiola y finalmente se destila y se titula (*Manual Lab. Pedología, sin año*). Una vez realizado el procedimiento, se aplica la siguiente fórmula:

$$CIC = \frac{\text{ml. de H}_2\text{SO}_4 * N \text{ H}_2\text{SO}_4}{\text{g. de muestra}} * 100$$

Donde:

$$\text{g. de muestra} = \frac{\text{ml. de alícuota}}{\text{ml. de aforo}} * \text{g. total pesado}$$

2.4.3.2.5 CONTENIDO DE BASES INTERCAMBIABLES

Son determinadas por extracción con acetato de amonio (1N a pH=7). Consistió en lixiviar una muestra de suelo (1 g) con una solución de acetato de amonio para desplazar los cationes presentes en el complejo de intercambio del suelo, se expresa en ppm (partes por millón). Al recoger 100 ml de

la solución, se realizó la lectura de las bases por espectrofotometría de llamas (*Manual lab. Pedología, sin año*). Para determinar el contenido de cada elemento se usa la ecuación:

$$\text{Elemento} = \frac{\text{Extracto} * \text{ml de aforo} * 100 * 1000}{1000000 * \text{g de muestra} * \text{peso equivalente de cada elemento}}$$

2.4.3.2.6 CONTENIDO DE FÓSFORO INTERCAMBIABLE (P DISP)

En este caso se empleó el método de extracción de Kurt-Bray para suelos ácidos, donde el fósforo es extraído con fluoruro de amonio (NH_4F), que reacciona con los iones Al^{+3} y Fe^{+3} (unidos a los fosfatos). Este fósforo extraído se hizo reaccionar con molibdato de amonio y cloruro estañoso, para dar el complejo fosfomolibdato (color azul). El cloruro estañoso reduce la combinación de fósforo del “fósforo-molibdeno”. Finalmente la concentración de fósforo se determinó colorimétricamente considerando la intensidad del color, que es directamente proporcional a la cantidad de fósforo presente en la muestra de suelo (*Manual lab. Pedología, sin año*).

2.4.3.2.7 NITRÓGENO TOTAL (NT)

Determinado por el método de Kjeldahl, que transforma N-orgánico en N-mineral (Figura 2.19). Para esto (1) se destruyó la materia orgánica (digestión) con una solución ácida (H_2SO_4 catalizadores) y se transformó el N-orgánico en sales amónicas (sulfato de amonio). La muestra de 500 mg se colocó a 360°C - 410°C para catalizar la reacción. (2) Se transformó el amonio en amoníaco (NH_3) neutralizando el medio con NaOH, el NH_3 fue arrastrado por destilación con vapor de agua hacia una trampa de ácido bórico, donde es transformado nuevamente en NH_4 por la acidez. Se realizó una titulación con H_2SO_4 para restablecer el pH original del ácido bórico que es indicativo de que finalizó la titulación. Al aplicar una solución indicadora se observa un cambio de color (verde – gris morado) (*Manual Lab. Ecología Vegetal, sin año*).

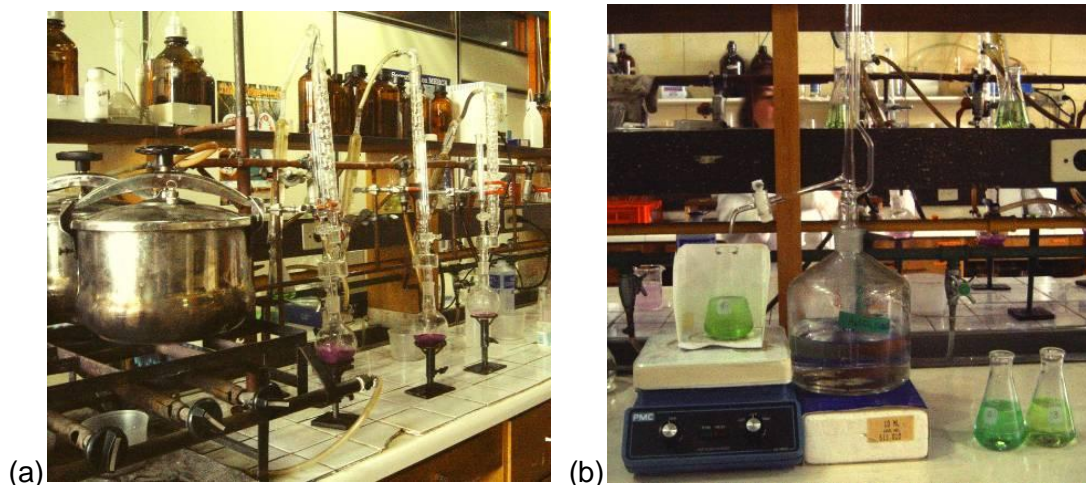


FIGURA 2.19. (a) Destilador manual; (B) Titulador.

2.4.3.2.8 NITRÓGENO MINERAL (NM)

El método de determinación fue por extracción, destilación y titulación (Figura 2.20). A diferencia del método de Kjeldahl, la digestión es omitida ya que el nitrógeno está en forma inorgánica. Se utilizó el equivalente en peso húmedo a 40 g de suelo seco. La extracción de la muestra de suelo seco se hizo con cloruro de potasio (1 N, 150 ml por frasco) que desplazó con sus iones K^+ al amonio de los espacios intercambiables por agitación durante 30 minutos y posterior centrifugación por 10 minutos; luego se realizaron dos destilaciones seguidas que separaron las distintas formas de nitrógeno mineral, (amonio y nitritos-nitratos respectivamente) con la adición de óxido de magnesio que favorece la producción de amoníaco para la primera, y utilizando la aleación dewarda (altamente reductora), para convertir los nitratos y nitritos en amonio en la segunda. Finalmente se hizo una titulación igual que la realizada para determinar el N total (*Manual Lab. Ecología Vegetal, sin año*). Se hicieron tres réplicas por muestra. Los contenidos de N se obtienen en $mg\ kg^{-1}$ de suelo.

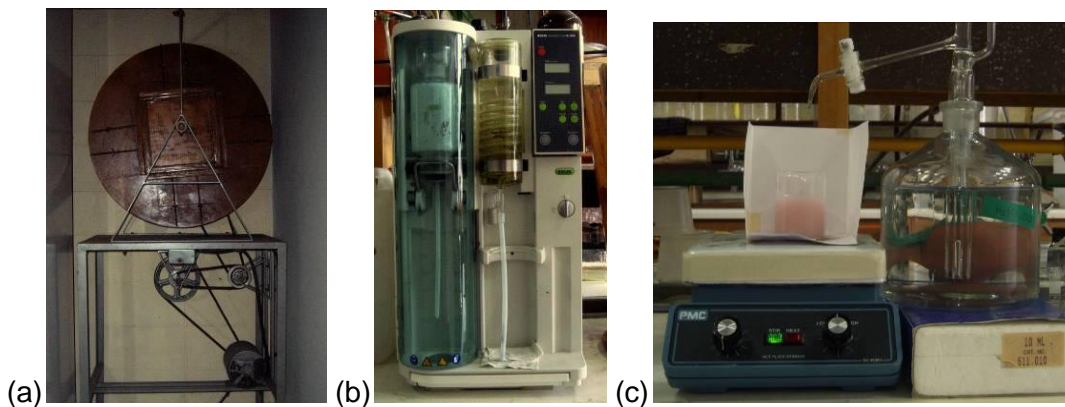


FIGURA 2.20. (a) Agitador (b) Destilador automático (c) Titulador

2.4.3.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES BIOLÓGICAS

2.4.3.3.1 RESPIRACIÓN

Se determinó por incubación del suelo durante 48 horas a 28 °C en una cámara de incubación (Figura 2.21). Se colocaron 100 g de suelo rehumedecido al 80% de su CC en frascos herméticos con una trampa de hidróxido dentro de cada uno. El CO_2 respirado es atrapado por el NaOH, el cual se hizo precipitar posteriormente con cloruro de bario para titular el NaOH restante con un ácido.

Las trampas contenían NaOH (0,3 N). El volumen varió, con 30 ml para PN, SA y LR, y 20 ml para LD (donde se esperó encontrar los valores más bajos de respiración). Se hicieron 4 réplicas para cada suelo y además 4 blancos para las trampas de 30 ml y 4 blancos para las de 20 ml. Los volúmenes fueron tomados considerando los resultados obtenidos por *Felicien (2009)* con el fin de lograr que el consumo de la trampa oscile entre el 25 y el 75 %.

Una vez finalizada la incubación se tomaron 2 alícuotas de 5 ml de NaOH por cada suelo. Dicha alícuota es mezclada con 2,5 ml de cloruro de bario y posteriormente fue titulada con ácido sulfúrico (0,1 N). La concentración del ácido debe ser $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ de la concentración de la trampa. Una vez obtenido el volumen de ácido utilizado en la titulación, se aplicó la ecuación:

$$\text{Respiración} = (\text{ml de ácido blanco} - \text{ml de ácido muestra}) * N \text{ ácido} * (\text{peso C}/2) * (V \text{ trampa} / V \text{ alícuota})$$

Donde los ml son el volumen de ácido utilizado en la titulación, N ácido (normalidad del ácido con el que se tituló (H_2SO_4 0,1 N) (Nielsen y Winding, 2002). El C respirado por las MOS se calculó:

$$\text{Cresp} = (\text{Respiración}/1000) * (\% \text{C-MOS} * 100). \text{ Unidades: } \text{g C-CO}_2 \text{ } 100\text{g}^{-1} \text{ suelo}$$

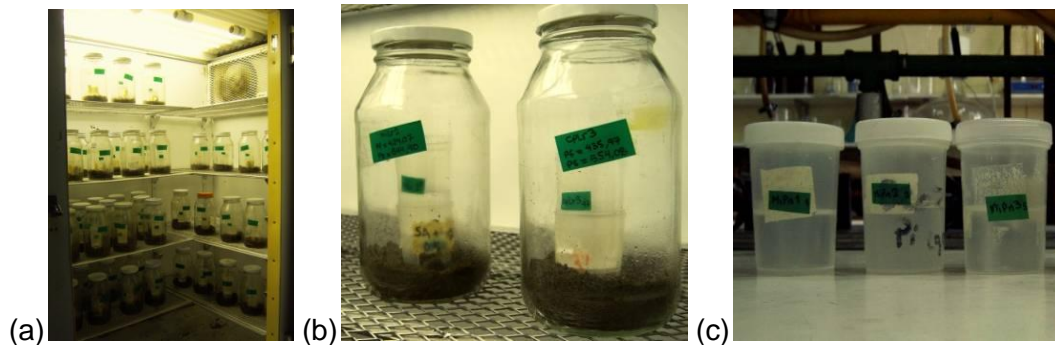


FIGURA 2.21. (a) Cámara de incubación, (b) Envases con la muestra de suelo, (c) Trampas de hidróxido de sodio.

Microbiología

Las determinaciones microbiológicas se realizaron mediante la observación de patrones de ocurrencia de un atributo evaluado a lo largo de una dilución seriada y tablas del método del número más probable (NMP). Este método es utilizado cuando no puede evaluarse el tamaño de la población contando células individuales, por el contrario, estima la población en un sustrato líquido. Asume que todos los organismos están distribuidos al azar en todas las diluciones y que los organismos contenidos en el inóculo representan un volumen apropiado como para dar un resultado positivo (Woomer, 1994).

Para determinar los diferentes grupos de bacterias (bacterias heterótrofas, oligotrofas, copiotrofas, proteolíticas y celulolíticas) se hizo una estimación previa del tamaño de la población total bacteriana en cada muestra de suelo. Esta prueba además confirmó la viabilidad de tales muestras. Para esto (a) se preparó un medio de cultivo ACN (Ver composición en García, 2010) que se sirvió con una pipeta multicanal en microplacas de titulación de 12 x 8 pozos, 150 μl por pozo (Figura 2.23), luego (b) se adicionó a cada pozo 50 μl de cada dilución de suelo (de 10^{-1} a 10^{-8}) con 4 réplicas por dilución. La dilución -1 se hizo con 45 ml de solución fisiológica al 0,85% (NaCl) y el equivalente a 5 g de suelo seco (peso equivalente = $5 * [(CHR/100) + 1]$), las siguientes diluciones partieron de 1 ml de la dilución

anterior y 9 ml de solución fisiológica, (c) se cerraron las placas con papel parafilm y se incubaron por 1 semana a 24°C en oscuridad, (d) finalmente se determinaron los tamaños de las poblaciones de bacterias empleando las tablas de NMP y se corrigieron los valores multiplicando el tamaño obtenido por una constante, pues las tablas de NMP asumen los tamaños poblacionales partiendo de 1 ml de inóculo, (inóculo usado [0,05 ml]*constante[20] = 1 ml inóculo) (Woomer, 1994). Los tamaños poblacionales se transformaron a $\log_{10}(x+1)$ (Gonzales, 2004).

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con los resultados de *García (2010)*, lo que permitió definir el rango de diluciones a sembrar para cada muestra de suelo y cada grupo de bacterias, de esta manera se asegura la extinción de la población en el rango de diluciones tomadas, evitando obtener únicamente resultados positivos, lo que impediría estimar los tamaños poblacionales.

2.4.3.3.2 POBLACIÓN DE BACTERIAS HETERÓTROFAS

El cultivo se hizo sobre un medio ACN (Alto Contenido De Nutrientes) (Ver composición del cultivo en *García, 2010*) donde se determinó la degradación de un sustrato carbonado junto al crecimiento microbiano mediante el cambio de color del indicador de oxido-reducción cloruro de trifeniltetrazolio (CTT), esterilizado por filtración (filtro millipore de 0,22 μm de diámetro de poro) a una concentración final de 0,075 mm. La principal fuente de Cen este medio es la glucosa y como fuente de N el KNO_3 .

Partiendo de cada muestra de suelo se tomaron 3 submuestras, se sembraron 3 réplicas por cada submuestra, con 4 réplicas por cada dilución (Figura 2.22). Igual que en la estimación previa, se distribuyeron 150 μl de medio y 50 μl de inóculo por pozo, se incubó en oscuridad a 24 °C por 4 semanas. Los resultados se obtuvieron de la misma manera que en la estimación previa de las poblaciones totales, con tablas del NMP y haciendo las transformaciones correspondientes (Fuentes y Massol-Deyá, 2002).

Para las poblaciones muy grandes, se sembraron diluciones más altas. Cuando la dilución inicial es diferente a 10^{-1} , se multiplicó el resultado obtenido de las tablas del NMP aumentando el tamaño de la población un orden de magnitud por cada dilución previa a la dilución inicial utilizada en la siembra (Woomer, 1994).

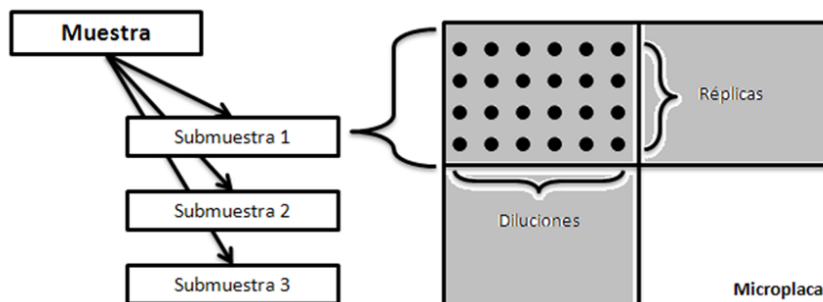


FIGURA 2.22. Réplicas realizadas en las pruebas de microbiología. Los puntos negros son los pozos de las microplacas de titulación, los recuadros grises son las réplicas hechas para cada submuestra.

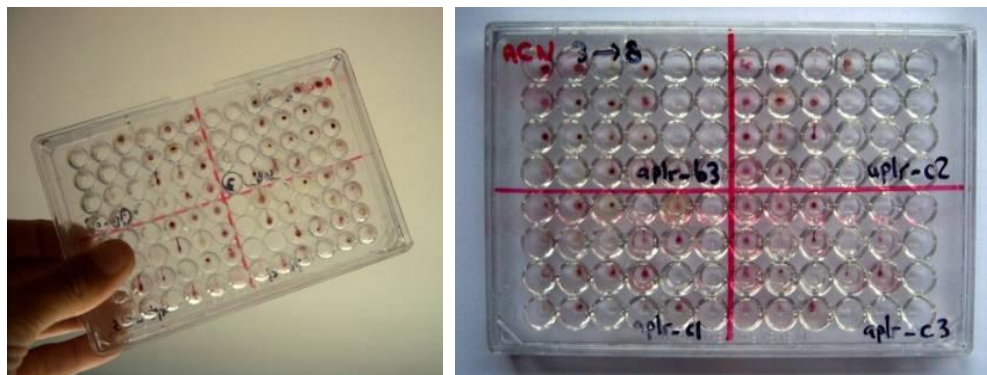


FIGURA 2.23. Microplacas de titulación para la determinación de los grupos microbiológicos (bacterias heterotrofas, oligotrofos, copiotrofos y proteolíticos).

2.4.3.3.3 RELACIÓN DE ORGANISMOS OLIGOTROFOS/COPIOTROFOS

Los organismos oligotrofos (de crecimiento lento) se determinaron en un medio de cultivo BCN (bajo contenido de nutrientes), con la misma composición del medio ACN pero diluido 1:100 (Ver composición del Cultivo en *García, 2010*) después de 4 semanas de incubación a 25 °C en oscuridad se leyeron los resultados. Los organismos copiotrofos (de rápido crecimiento) fueron determinados sobre la siembra de bacterias heterótrofas en un medio ACN, la diferencia entre este grupo y las bacterias heterotrofas fue el momento de leer los resultados. Se hicieron lecturas todos los días durante una semana, en los 3 primeros días se observó un crecimiento rápido, luego la población siguió aumentando más lentamente hasta llegar a un tamaño estable; los copiotrofos fueron considerados cuando se observó la primera disminución en el aumento de las poblaciones bacterianas (4to día de lectura). Las poblaciones se determinaron con tablas del NMP (*Fuentes y Massol-Deyá, 2002 y García, 2010*).

2.4.3.3.4 POBLACIÓN DE PROTEOLÍTICOS

Este grupo de microorganismos se cultivó en un medio a base de gelatina, con el indicador CTT y algunas soluciones nutritivas (SSW y SET) (Ver Medios de cultivo de *García, 2010*) siguiendo el mismo procedimiento que con las bacterias heterótrofas, sobre microplacas de titulación y con las tablas del NMP. Su proliferación se determinó después de haber colocado las microplacas en un refrigerador a 4 °C durante hora y media y observando si se mantenía la licuefacción de la gelatina, para considerarlo como un resultado positivo (*Fuentes y Massol-Deyá, 2002, Diz-Cid, 2003; Gonzales, 2004 y García, 2010*).

2.4.3.3.5 POBLACIÓN DE CELULOLÍTICOS

La determinación de los organismos celulolíticos se hizo en tubos de ensayo, colocando 8 ml del medio de cultivo y algunas soluciones nutritivas (SSW y SET) y una tira de papel de filtro como fuente de celulosa para la alimentación de los microorganismos (Ver Medios de cultivo de *García, 2010*) (Figura 2.24); y el inóculo de 1 ml. Se hicieron 3 submuestras con 3 réplicas por cada una y a su vez 3 réplicas por cada dilución. Los tubos se sellaron con algodón y papel aluminio para incubar por 4 semanas en oscuridad a 25 °C. La lectura de los resultados se hizo con las tablas del NMP respectivas a las pruebas hechas con 3 réplicas por dilución. Se consideraron positivos los tubos en los que en los que la banda de papel filtro apareció atacado, roto o coloreado (*Fuentes y Massol-Deyá, 2002, Gonzales, 2004 y García, 2010*).



FIGURA 2.24. Tubos de ensayo con cultivo de microorganismos celulolíticos donde se utiliza como fuente de celulosa una tira de papel de filtro.

2.4.3.3.6 EXPERIMENTO DE FERTILIDAD

En condiciones controladas se sembraron plantas de maíz (*Zea mays*) en cada suelo, para obtener un dato de productividad, que será considerado como medida de fertilidad del suelo (Figura 2.25). La siembra se realizó en el laboratorio garantizando un adecuado suministro de agua, que permitió evaluar en los suelos únicamente el aspecto nutricional de la fertilidad. Se hicieron 5 réplicas con 1 kg de suelo seco al aire, no tamizado, que fue colocado en una bolsa de vivero y rehumedecido con un volumen fijo de agua. En cada bolsa se colocó una semilla pre-germinada de maíz. Se dejaron crecer las plantas únicamente durante 1 mes, el experimento se desmontó y se determinó la biomasa luego de ser lavada y secada en estufa (40 °C por 1 semana). El ensayo de fertilidad arrojó varias variables, todas expresadas en g de peso seco: biomasa total (BMt), biomasa aérea (BMa), biomasa subterránea (BMs) y la relación biomasa subterránea/biomasa total (BMs/t).

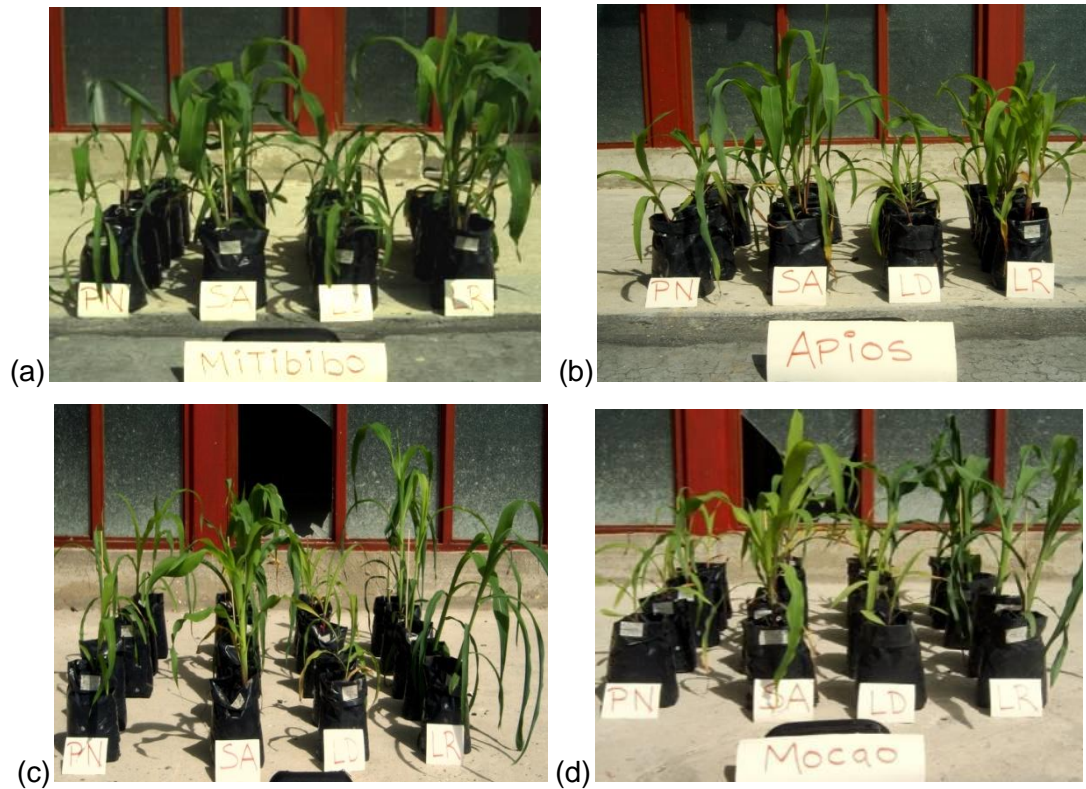


FIGURA 2.25. Documentación fotográfica del ensayo de fertilidad, se muestran las diferentes replicas de cada tratamiento en las cuatro localidades al momento de la cosecha, cuando las plantas tenían un mes de sembradas. (a) Mitibibó, (b) Los Apios, (c) La Campana y (d) Moca.

2.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

2.5.1 Eliminación de datos anómalos

Los datos de cada variable pasaron por un procedimiento previo de depuración donde se procuró eliminar los valores dentro de las réplicas analíticas que se alejaron significativamente de la media (datos anómalos), pues la variabilidad observada entre réplicas analíticas depende principalmente del método de determinación y no de las condiciones del suelo. Para esto se hicieron dos pruebas: coeficiente de variación (CV), medida de la distribución de los datos que omite la dimensionalidad de los valores determinados, permitiendo la comparación de varios grupos expresados en diferentes unidades; considerando anómalos aquellos valores con $CV > 10\%$ [$CV = (SD * 100) / X \text{ Media}$]. Por otra parte, se realizó el test Q para la determinación de "outliers", aplicando las ecuaciones: [$lim \text{ inf} = Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)$] y [$lim \text{ sup} = Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)$] que establecen los límites inferior y superior de los cuartiles dos y tres respectivamente, de una campana de Gauss hipotética, que ha sido dividida en cuatro cuartiles; excluyendo así los valores que se ubicaron en las colas (cuartiles uno y cuatro) (Sokal Y Rohlf, 1986).

2.5.2 Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza aplicando permanovas de dos vías utilizando el paquete estadístico Primer 6.0 (*Anderson y col, 2005 y 2008*); la prueba está basada en medidas de P generadas por permutaciones hechas en una matriz de distancias euclidianas. (*Anderson, 2005*). El análisis de dos vías o factores, distinguió las historias de uso (tratamientos: PN, SA, LD, LR) como factor fijo y las localidades (réplicas: MI, AP, CP y MO) como el factor aleatorio, representado la variabilidad ambiental que surge como consecuencia de tener réplicas en lugares geográficamente diferentes (con diferentes condiciones de humedad, exposición, pendiente, geomorfología, etc). Así se resta de la variabilidad total, aquella que proviene del eje “localidad” al momento de hacer las permutaciones. Una de las limitaciones en este diseño es que no se puede evaluar la interacción tratamiento x localidad porque no se tienen réplicas de cada tratamiento dentro de la misma localidad. Se complementó el análisis con un *test post hoc* (Monte Carlo) (*Anderson, 2005*) que identificó los tratamientos que resultaron significativamente diferentes.

Se hicieron análisis multivariados (análisis de componentes principales -ACP), con los datos centrados y estandarizados, para poder comparar variables expresadas en diferentes unidades, utilizando *Canoco For Windows 4.5*. Según el ordenamiento de las parcelas se identificaron los gradientes asociados a cada eje del ACP y se relacionaron con los cuatro tratamientos. Se hizo un círculo de correlaciones que nos permitió visualizar las variables con correlación estadísticamente significativa con cada uno de los ejes. De esta manera se reconocieron las variables relacionadas con cada transformación. Una de las limitaciones que presentan los análisis multivariados es que se puede ver afectado por tener muchas más variables que sitios de estudio (16 sitios y 42 variables).

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson en Spss 17.0, para distinguir las variables que están altamente correlacionadas entre sí; de esta manera se identificaron algunas redundancias que nos permitieron disminuir el número de variables consideradas en la elaboración de un índice para evaluar el estado del suelo.

Finalmente se hizo un análisis de clasificación (dendrograma) en PC-ord con las variables estandarizadas, lo que nos arrojó una clasificación según distancias euclidianas y se utilizó Ward como método para unir los grupos. Esto nos orientó en cuanto a grupos de variables con comportamientos similares, lo cual fue de utilidad al momento de construir algunos Índices del estado del suelo.

2.6 CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE PARA EVALUAR EL ESTADO DEL SUELO

Se construyeron tres índices diferentes. Los dos primeros para evaluar los aspectos específicos, fertilidad y degradación respectivamente y el tercero, integrando varias funciones del suelo; dándole dos enfoques contrastantes (modelos de índice integrado), uno con la perspectiva de evaluar conservación de los procesos ecosistémicos y otro con una visión dirigida hacia la producción agrícola.

2.6.1 Índice de Fertilidad del Suelo (IFS)

Se construyó mediante una regresión múltiple en SPSS 17.0, donde se consideró como variable dependiente la biomasa aérea del maíz (BMa) y como variables independientes todas las demás variables físicas, químicas y biológicas determinadas en el suelo. La ecuación múltiple lineal obtenida arrojó un grupo de variables consideradas indicadores de fertilidad (variables independientes), por ser las que mejor explican la productividad (BMa). Los valores más altos del índice reflejan mayor fertilidad del suelo. Se consideró como variable dependiente la biomasa aérea del maíz por ser ésta la variable de más fácil determinación entre las variables obtenidas del ensayo de fertilidad ya que las raíces son más difíciles de evaluar.

2.6.2 Índice de Degradación del Suelo (IDS)

Los valores que puede obtener este índice oscilan entre 0 y 1; con los valores más altos correspondientes a los suelos con mayores evidencias de degradación y los valores más bajos correspondientes a los suelos menos afectados o menos degradados. Para su construcción se: (A) reconoció el gradiente de degradación en el ACP por la separación de PN y LD y se identificaron las variables sensibles a dicha transformación considerando aquellas propiedades que mostraron correlaciones significativas con dicho eje, usando el círculo de correlación. (B) Los indicadores fueron clasificados como “más es mejor” (aquellos que indican mejoras con su aumento, es decir valores bajos en suelos degradados y altos en suelos de páramo) y “menos es mejor” (aquellos que disminuyen con las condiciones óptimas, es decir que tienen valores altos en los suelos degradados). (C) Cada indicador fue estandarizado para que variara entre 0 y 1, considerando un rango 10 % más amplio en el límite inferior y superior respectivamente, de lo obtenido en los datos de este trabajo (16 valores por cada variable) (valor min – 10 % y valor máx + 10 %), de esta manera el índice será aplicable en suelos que están algo fuera del rango que ocupan los suelos determinados en este trabajo. Para la estandarización se obteniendo una ecuación lineal entre el valor mínimo y el máximo que nos permite extrapolar los valores del indicador determinado en campo (X) al valor estandarizado (Y).

Se muestra un ejemplo de la estandarización para el contenido de MOS, mediante la construcción de una regresión lineal que nos permite extrapolar un valor cualquiera de esta propiedad (eje X) sobre un valor estandarizado (eje Y, entre 0 y 1), usando los 16 valores obtenidos para la variable (Figura 2.26).

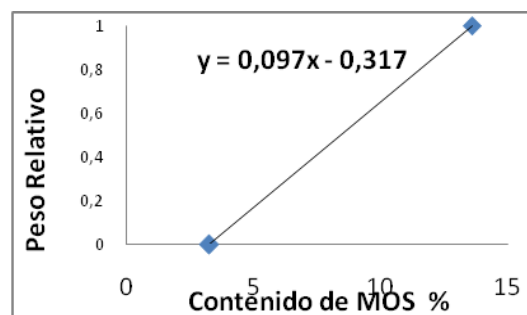


FIGURA 2.26. Ejemplo de la estandarización de un indicador (mos) mediante una regresión lineal para el índice de degradación del suelo. El valor 0 se asigna al valor mínimo obtenido del indicador en las 16 parcelas menos 10% y el valor 1 al máximo valor + 10%.

(D) Se hizo una distribución relativa de los pesos para cada variable considerada, estos se asignaron equitativamente entre los indicadores seleccionados de forma que al sumar los valores de cada indicador, el valor máximo del índice sea 1. (E) Se aplicó el índice evaluando los indicadores seleccionados y finalmente se sumaron todos sus pesos relativos.

2.6.3 Índice integrado de la Calidad del Suelo (ICS)

Se construyó un índice integrado de calidad del suelo que se planteó siguiendo los lineamientos de *Karlen y col, (1994)* y *Glover y col, (2000)*. Estos autores proponen que el índice se base en evaluar funciones del suelo, como capacidad de retener agua y nutrientes (función 1), resistencia a la degradación (función 2) y capacidad de proveer condiciones favorables para el desarrollo vegetal óptimo (*Karlen y col, 1994*). Entre las funciones del suelo planteadas se encuentran dos niveles jerárquicos que surgen de la gran complejidad de este sistema, considerando un nivel 1 con las funciones básicas del suelo, más generales y un nivel 2 con subgrupos que reflejan aspectos, procesos y condiciones más específicas del suelo (Figura 2.27).

Una vez definidas las funciones que integrarán el índice es necesario asignar a cada una, un conjunto de indicadores; los cuales pueden ser poco exclusivos (pueden estar relacionados con más de una función del suelo), por lo tanto algunos están repetidos en varias funciones. Se consideraron las correlaciones de Pearson entre variables para seleccionar los sets de indicadores de cada función; considerando variables con bajos coeficientes de correlación entre sí, para evitar redundancias dentro de los grupos.

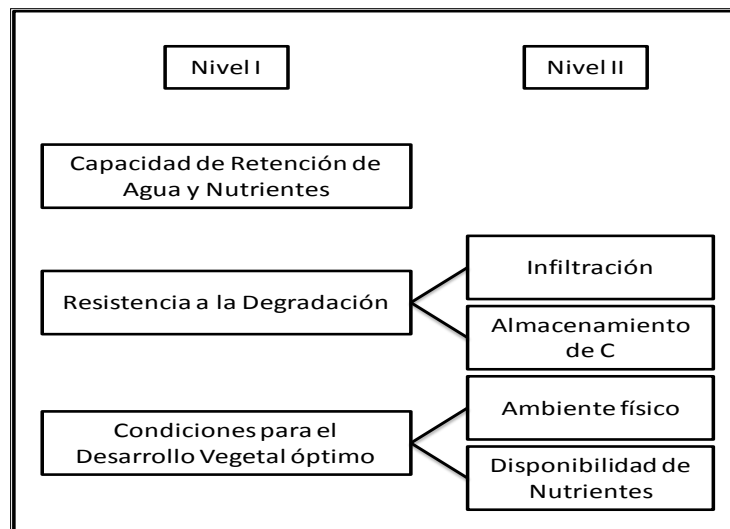


FIGURA 2.27. Funciones edáficas consideradas para la construcción del Índice de Calidad del Suelo, considerando dos niveles de interpretación y especificidad.

VARIABLES que mostraron altas correlaciones con los indicadores básicos seleccionados, fueron planteadas como indicadores sustitutos, considerando además el papel que juegan dentro de la función en la que son agrupados; de esto resultaron dos sets de indicadores que pueden ser utilizados según la disponibilidad de información que tenga el aplicador. Igual que para el índice de degradación del suelo; se clasificó, estandarizó y se colocó un peso relativo a cada indicador seleccionado dentro de su función. En este índice integrado, se consideró un tercer tipo de indicador, clasificado como “más es mejor con un límite superior fijo” (que mejora con su aumento hasta un umbral superior), esto se hizo en casos en los que el aumento del indicador no causa ninguna mejoría en el estado del suelo.

Partiendo de las funciones pautadas; se calcularon dos diferentes *modelos del índice integrado de calidad del suelo*, modificando la distribución de los pesos relativos entre las funciones, para un valor máximo de calidad edáfica, igual a 1 en cualquiera de los casos. La distribución desigual de los pesos relativos para cada una de las funciones se hizo con el fin de lograr dos enfoques diferentes del índice.

El primero (modelo 1), que evalúa la calidad del suelo en base a la capacidad de retener agua (función 1) que es uno de los principales servicios ambientales que prestan estos ecosistemas de alta montaña tropical, y su capacidad para resistir la degradación (función 2) que le atribuye una mayor sustentabilidad a estos sistemas. La segunda función está conformada por dos subgrupos de indicadores, el primero asociado a la capacidad de infiltrar agua (función 2.1) y el segundo a la capacidad de almacenar C (función 2.2).

El segundo (modelo 2), incluye además de estas dos funciones una tercera, el desarrollo óptimo de la vegetación (función 3), que está conformado por un subgrupo que representa condiciones físicas ideales (función 3.1) y otro asociado a la disponibilidad de algunos nutrientes vitales para la vegetación (función 3.2).

Finalmente el índice fue aplicado a los resultados obtenidos en este trabajo, usando las ecuaciones obtenidas de la estandarización de cada indicador. Estos valores de Y se multiplicaron por su peso relativo y se sumaron entre sí para obtener el peso de cada función, que a su vez se multiplicó por el peso relativo de la función, que sumados arrojan el valor del ICS. Este índice cuenta entonces con varios enfoques diferentes considerando que están el Modelo 1 y 2 que puede calcularse con dos sets de indicadores diferentes (básicos y sustitutos). Partiendo de los dos sets de indicadores para evaluar el índice, se hizo una correlación entre los indicadores básicos y sustitutos, esto nos permitió ver la correspondencia entre ambos sets de datos y la fiabilidad de los resultados obtenidos del índice calculado con indicadores básicos o sustitutos.

2.6.4 Análisis Estadístico de los resultados del Índice

Para cada uno de los índices calculados se hizo un análisis de varianza, Permanova, con el fin de mostrar si hay diferencias significativas entre las historias de uso evaluadas. También se evaluaron diferencias entre las localidades para visualizar el efecto del bloque.

3 RESULTADOS

Los resultados son presentados en dos secciones, la primera describe el funcionamiento del suelo, comenzando por mencionar que después de analizados los datos se descubrió, debido a su comportamiento anómalo, que el páramo natural escogido para la localidad Mocao era en realidad una ladera triguera pero con una vegetación bastante recuperada y similar a la de un páramo; luego se muestran los resultados de los permanovas que resaltan las propiedades que fueron sensibles ante los diferentes tratamientos evaluados y finalmente se presenta el análisis de componentes principales.

La segunda sección de los resultados describe la construcción del índice de calidad del suelo, comenzando por analizar las relaciones que hay entre las diferentes propiedades edáficas, a través de las correlaciones de Pearson y el análisis de clasificación. Basados en los resultados obtenidos de ambas pruebas y considerando lo recomendado en la bibliografía, se plantean a continuación los tres índices que se construyeron para evaluar el estado del suelo con diferentes enfoques.

3.1 EL FUNCIONAMIENTO DEL SUELO

3.1.1 Comportamiento anómalo de Mocao.

Comenzamos señalando este aspecto para advertir al lector que debe tenerlo en cuenta a lo largo de esta sección de resultados. Cuando se analizó en detalle el comportamiento del suelo correspondiente al paramo natural en Mocao (MOPN) en comparación con los demás PN evaluados, se observó que el mismo se comportaba más bien como un suelo con intervención antrópica, que como veremos presentan pérdidas de MOS y de arcilla. Indagando más sobre este suelo, en busca de una explicación se encontró una fotografía aérea del año 1952 (Figura 3.1) (*Misión: A-34 hoja 4, faja Comp., foto n° 178*) donde se observa que el sector donde se ubicó MOPN, era una ladera degradada para entonces, con presencia de eras para trillar trigo y muros de piedra. Confirmando así la identidad del suelo en cuestión y considerando este error al momento de hacer interpretaciones sobre el funcionamiento del suelo.

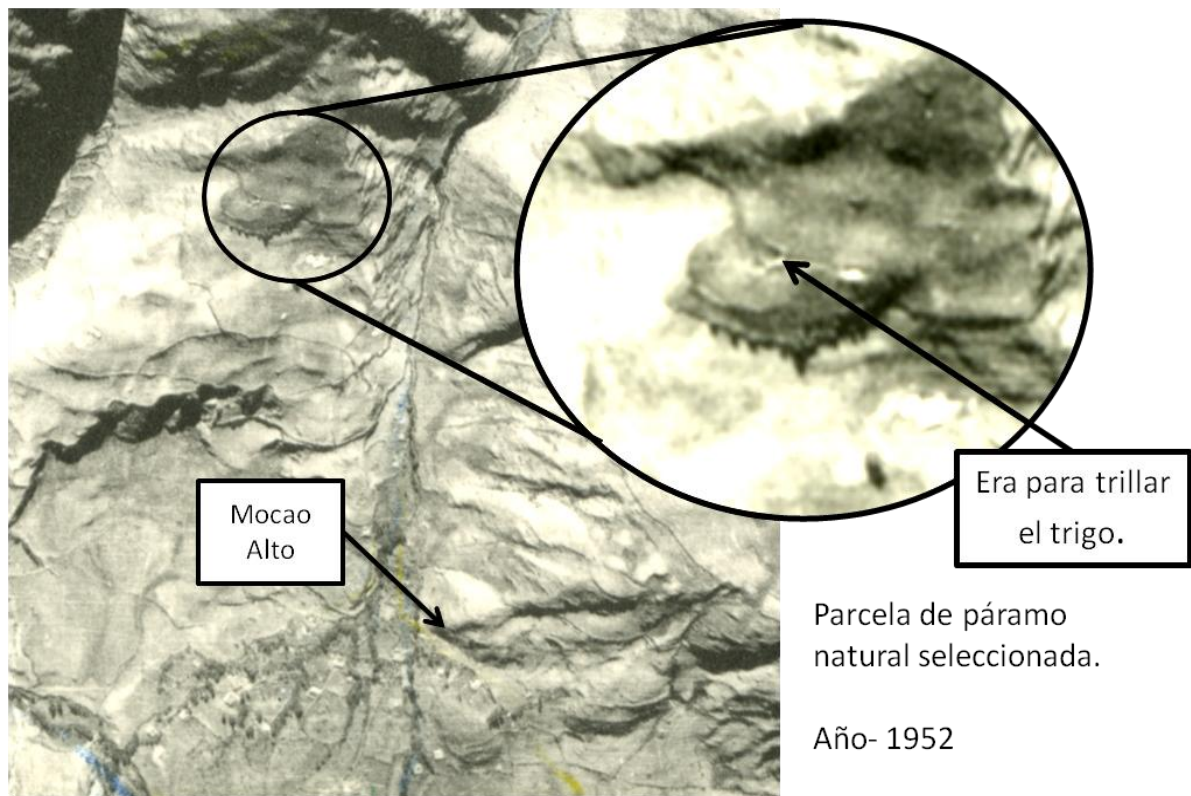


FIGURA 3.1. Foto aérea de la localidad Moca del año 1952, donde se resalta la parcela seleccionada como páramo natural, y se observa la presencia de una era para trillar, lo que sugiere fuertemente que fue cultivada con trigo.

3.1.2 Análisis de Varianza

En las Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, se presentan los resultados del análisis de varianza realizado para cada una de las variables físicas, químicas y biológicas respectivamente. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables físicas determinadas, caso contrario a lo observado en las variables químicas y biológicas. Reflejando que las propiedades físicas (Tabla 3.1) son de difícil recuperación, asociadas a la degradación; mientras que las demás (Tabla 3.2 y Tabla 3.3) dependen en gran parte del manejo agrícola y responden casi inmediatamente a éste.

TABLA 3.1. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables físicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P. Variables. CC: capacidad de campo (%); PMP: punto de marchitez permanente (%); CH: conductividad hidráulica (cm hora^{-1}); W: contenido de agua gravimétrica en saturación (%); Q: contenido de agua volumétrica en saturación (%); arc: contenido de arcilla (%); are: contenido de arena (%); lim: contenido de limo (%); Db: densidad aparente (g cm^{-3}); Df: densidad de la fracción fina (g cm^{-3}); Da: cantidad de fracción fina por unidad de volumen (g cm^{-3}); Dg: densidad de la fracción $> 2\text{mm}$ (g cm^{-3}); %FG: porcentaje de la fracción $>2\text{mm}$ (%).

Variabes	Páramo natural (PN)	Agricultura intensiva (SA)	Ladera degradada (LD)	Ladera retomada (LR)	P
CC	28,07 \pm 4,45	21,60 \pm 6,33	21,00 \pm 3,41	21,15 \pm 3,15	0,1424
PMP	14,75 \pm 4,77	11,68 \pm 3,17	8,81 \pm 2,76	9,28 \pm 2,57	0,0610
CH	2,95 \pm 3,90	12,90 \pm 11,24	2,34 \pm 2,60	9,38 \pm 4,63	0,1069
W	36,96 \pm 5,88	35,32 \pm 6,23	31,12 \pm 4,28	33,00 \pm 7,43	0,5869
Q	44,64 \pm 4,54	41,93 \pm 2,52	42,26 \pm 2,25	40,78 \pm 5,87	0,6552
arc	19,26 \pm 6,45	10,91 \pm 4,19	13,33 \pm 6,06	11,26 \pm 1,67	0,1181
Are	50,03 \pm 11,33	61,55 \pm 8,98	56,57 \pm 11,08	58,47 \pm 4,62	0,2788
lim	30,71 \pm 5,14	27,55 \pm 5,28	30,09 \pm 5,52	30,27 \pm 4,6	0,6706
Db	1,23 \pm 0,10	1,22 \pm 0,21	1,33 \pm 0,10	1,26 \pm 0,10	0,6687
Df	0,93 \pm 0,10	0,87 \pm 0,16	1,08 \pm 0,05	0,92 \pm 0,02	0,1190
Da	0,71 \pm 0,12	0,67 \pm 0,15	0,77 \pm 0,05	0,69 \pm 0,04	0,6001
Dg	2,17 \pm 0,24	2,25 \pm 0,09	2,21 \pm 0,19	2,37 \pm 0,12	0,4756
%FG	39,84 \pm 11,68	43,39 \pm 12,95	41,31 \pm 5,82	44,37 \pm 7,54	0,8912

TABLA 3.2. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables químicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P. Variables. CE: conductividad eléctrica (dS m^{-1}); MOS: contenido de materia orgánica del suelo (%); CIC: capacidad de intercambio catiónico ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$ suelo); Pdisp: contenido de fósforo disponible (ppm); Ca: contenido de calcio disponible (idem: Mg, K, Na) (ppm); Sat Bases: saturación de bases (%); NH_4^+ : contenido de amonio (mg kg^{-1} suelo); NO_3^- : contenido de nitratos (mg kg^{-1} suelo); Nm: contenido de nitrógeno mineral total (mg kg^{-1} suelo); NO_3^-/Nm : relación nitratos/nitrógeno mineral total (mg kg^{-1} suelo); Nt: contenido de nitrógeno total (%); C/N: relación carbono/nitrógeno. Los asteriscos indican diferencias significativas entre los suelos para esa variable y las letras diferentes indican grupos diferentes.

Variable	Páramo natural (PN)	Agricultura intensiva (SA)	Ladera degradada (LD)	Ladera retomada (LR)	P
pH	5,04 \pm 0,43	5,74 \pm 0,49	5,41 \pm 0,61	5,29 \pm 0,5	0,3419
CE	0,04 \pm 0,01 b	0,19 \pm 0,02 ab	0,03 \pm 0,00 b	0,66 \pm 0,46 a	0,0079*
MOS	10,14 \pm 1,84 a	7,73 \pm 3,15 ab	6,11 \pm 1,56 b	5,61 \pm 1,78 ab	0,0511*
CIC	5,28 \pm 0,9	5,73 \pm 1,60	3,60 \pm 1,46	4,73 \pm 1,22	0,1932
P disp	12,28 \pm 7,13 ab	50,23 \pm 36,5 a	8,23 \pm 8,97 b	47,45 \pm 27,84 ab	0,0359*
Ca	2,59 \pm 1,68	6,65 \pm 1,84	3,42 \pm 3,59	4,80 \pm 1,35	0,0698
Mg	0,59 \pm 0,41 b	1,98 \pm 0,52 a	1,21 \pm 1,24 ab	1,75 \pm 0,64 a	0,0129*
K	0,41 \pm 0,2	1,05 \pm 1,49	0,29 \pm 0,18	0,82 \pm 1,5	0,7898
Na	0,02 \pm 0,01	0,03 \pm 0,01	0,12 \pm 0,21	0,13 \pm 0,2	0,3994
SatBases	66,62 \pm 36,50	176,30 \pm 53,68	149,24 \pm 151,47	162,01 \pm 67,33	0,2826
NH_4^+	1,88 \pm 1,06	0,80 \pm 0,4	1,76 \pm 1,14	36,24 \pm 48,02	0,1223
NO_3^-	0,39 \pm 0,48 b	12,89 \pm 3,88 a	0,02 \pm 0,04 b	18,43 \pm 8,41 a	0,0010*
Nm	2,28 \pm 1,23 b	13,69 \pm 3,6 ab	1,8 \pm 1,18 b	55,72 \pm 46,9 a	0,0121*
NO_3^-/Nm	14,1 \pm 14,31 b	93,30 \pm 4,65 a	0,92 \pm 1,84 b	57,3 \pm 41,4 ab	0,0476*
Nt	0,29 \pm 0,06 a	0,28 \pm 0,1 a	0,15 \pm 0,06 b	0,21 \pm 0,06 ab	0,0303*
C/N	20,18 \pm 1,23 ab	16,03 \pm 1,98 bc	24,36 \pm 5,64 a	15,76 \pm 1,54 c	0,0098*

TABLA 3.3. Valores promedio por tratamiento \pm desviación estándar para las variables biológicas determinadas y resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) indicando el valor de P. Variables. BHT: población de bacterias heterótrofas totales; Olig/Cop: relación oligotrofos/copiotrofos; Prot: población de proteolíticos; Cel: población de celulolíticos (variables microbiológicas expresadas como el log (NMP+1) de organismos por g⁻¹ suelo); Resp: respiración del suelo (g c-co₂ 100 g⁻¹ suelo); Cresp-MOS: contenido de carbono respirado por la materia orgánica del suelo (g C-CO₂ 100 g⁻¹ suelo); BMa: biomasa vegetal aérea; BMs: biomasa vegetal subterránea; BMt: biomasa vegetal total; BMs/t: relación biomasa vegetal subterránea/biomasa total (valores de biomasa expresados en g de peso seco). Los asteriscos indican diferencias significativas entre los suelos para esa variable y las letras diferentes indican grupos diferentes.

Variable	Páramo natural (PN)	Agricultura intensiva (SA)	Ladera degradada (LD)	Ladera retomada (LR)	P
BHT	5,25 \pm 1,10c	7,67 \pm 0,69ab	5,70 \pm 1,15bc	7,96 \pm 2,33a	0,0053*
Olig/Cop	1,03 \pm 0,09ab	0,94 \pm 0,19b	1,15 \pm 0,12ab	1,22 \pm 0,22a	0,0226*
Prot	5,11 \pm 1,11a	6,20 \pm 0,36a	5,51 \pm 0,94a	6,91 \pm 1,76a	0,0415*
Cel	0,65 \pm 0,08c	2,92 \pm 0,83ab	0,98 \pm 1,12bc	2,28 \pm 0,64a	0,0076*
Prot/BHT	0,98 \pm 0,03ab	0,81 \pm 0,04c	1,01 \pm 0,11a	0,89 \pm 0,11bc	0,0148*
Cel/BHT	0,13 \pm 0,03b	0,38 \pm 0,10a	0,17 \pm 0,17ab	0,30 \pm 0,07a	0,0396*
Cel/Prot	0,13 \pm 0,03b	0,47 \pm 0,12a	0,17 \pm 0,17ab	0,33 \pm 0,07a	0,0117*
Resp	2,07 \pm 0,13a	2,16 \pm 0,23a	1,39 \pm 0,14b	2,79 \pm 0,58a	0,0003*
Cresp-MOS	0,04 \pm 0,01b	0,06 \pm 0,03ab	0,04 \pm 0,01b	0,09 \pm 0,03a	0,0222*
BMa	0,37 \pm 0,08b	1,48 \pm 0,40a	0,26 \pm 0,06c	2,03 \pm 0,65a	0,0007*
BMs	0,52 \pm 0,11bc	0,84 \pm 0,25ab	0,35 \pm 0,04c	1,04 \pm 0,31a	0,0063*
BMt	0,87 \pm 0,11b	2,27 \pm 0,50a	0,64 \pm 0,09c	2,96 \pm 0,71a	0,0002*
BMs/t	0,59 \pm 0,09a	0,35 \pm 0,02b	0,56 \pm 0,03a	0,35 \pm 0,04b	0,0006*

Antes de hacer cualquier consideración con las variables que resultaron sensibles ante los tratamientos, se analizó el efecto del bloque (Tabla 3.4) que evalúa las diferencias que hay entre localidades. El limo por ejemplo fue mayor en Mitibibó que en La Campana, mientras que el Mg mostró el comportamiento contrario en las mismas localidades; el Nt resultó significativamente más alto en Mitibibó que en Los Apios; las poblaciones de proteolíticos y la relación oligo/copiotrofos resultaron ser más grandes en Mocoa, en contraste con Mitibibó y finalmente las bacterias heterótrofas se mostraron más abundantes en Mocoa, a diferencia de Los Apios. Estas variables no serían del todo adecuadas para evaluar la degradación de los suelos, ya que su variación no solo depende del grado de degradación sino también de la localidad.

TABLA 3.4. Valores promedio por localidad \pm desviación estándar para las variables que mostraron en el resultado de la prueba estadística de análisis de varianza (Permanova) el efecto del bloque, indicando el valor de P (todos menores de 0,05. Variables: lim: contenido de limo; Mg: contenido de magnesio; Nt: contenido de nitrógeno total; BHT: población de bacterias heterótrofas totales; Oligo/Copio: relación oligotrofos/copiotrofos; Prot: población de proteolíticos).

Variable	Mitibibó	Los Apios	La Campana	Mocoa	P
Lim	34,03 \pm 2,81 a	31,87 \pm 1,75 ab	26,24 \pm 4,55 b	26,48 \pm 4,62 ab	0,0471
Mg	0,73 \pm 0,78 b	1,32 \pm 0,77 ab	2,28 \pm 0,88 a	1,19 \pm 0,47 ab	0,0036
Nt	0,31 \pm 0,10 a	0,19 \pm 0,09 b	0,21 \pm 0,07 ab	0,21 \pm 0,04 ab	0,0537
BHT	5,19 \pm 1,14 bc	6,09 \pm 1,89 c	7,63 \pm 1,83 ab	7,67 \pm 1,31 a	0,0059
Olig/Cop	0,95 \pm 0,11 b	1,00 \pm 0,19 b	1,14 \pm 0,17 ab	1,25 \pm 0,13 a	0,0226
Prot	4,95 \pm 0,73 b	5,31 \pm 5,07 c	6,82 \pm 1,40 ab	6,65 \pm 0,83 a	0,0144

Partiendo de estas consideraciones, se caracterizaron los tratamientos y procesos de transformación evaluados según las respuestas arrojadas por cada variable. Los páramos naturales (PN) se caracterizan por altos contenidos de MOS, altos valores de respiración, bajos contenidos de Nm y NO₃⁻; bajas poblaciones de celulolíticos; baja proporción del carbono total respirado así como altas relaciones C/N. En el ensayo de fertilidad se obtuvieron bajos valores de BMs, BMt y una alta relación biomasa subterránea / total. En comparación con el PN, en los suelos con agricultura intensiva (SA), se encontró un aumento significativo de la CE, altas proporciones de celulolíticos (Cel/BHT y Cel/Prot), y de algunas formas de nitrógeno (NO₃⁻, Nm y NO₃⁻/Nm) y alta producción de maíz (BMt); asociado ésto con las menores relaciones de biomasa subterránea / total en estos suelos. La respiración mantuvo altos valores igual que en PN y finalmente se encontró una baja relación de Prot / BHT. En los suelos degradados (LD), se encontraron bajas proporciones de C respirado, Nm, NO₃⁻ y en el ensayo de fertilidad, al igual que en el páramo se midieron bajos contenidos de biomasa subterránea y biomasa total y altas proporciones de biomasa subterránea / total. La única variable que cambió significativamente en la transformación de PN a LD fue la MOS, que disminuyó fuertemente en LD. Estos suelos degradados muestran además la predominancia de proteolíticos (alta relación Prot/BHT). Finalmente, al evaluar la retoma (LD a LR) los cambios más evidentes fueron: el aumento en los contenidos de P disponible y NO₃⁻, y los valores más altos de Respiración, C respirado, biomasa aérea, biomasa total y biomasa subterránea en LR; estas últimas variables modularon la disminución de la relación biomasa subterránea / total. Las LR mostraron además grandes poblaciones de celulolíticos (altas Cel/BHT y Cel/Prot) y bajas relaciones C/N.

3.1.3 Análisis Multivariado

Los análisis multivariados permitieron identificar diferentes gradientes asociados con el manejo del suelo y su degradación y obtener una visión más integrada de los cambios ocurridos. En las Figura 3.2 y Figura 3.3 el resultado más evidente fue la separación en el Eje 1 entre PN - LD que ocuparon la parte izquierda del eje y SA – LR que se situaron a la derecha, por lo que se consideró éste primer eje como un gradiente de intervención agrícola. La separación entre el PN y LD, se asoció con el Eje 2, situándose los páramos en la parte inferior y las LD en la parte superior y fue considerado como un gradiente de degradación. Finalmente en la Figura 3.3 se observó, asociado al Eje 3, la separación de los dos suelos manejados (SA de LR), considerado como gradiente asociado al tiempo de manejo.

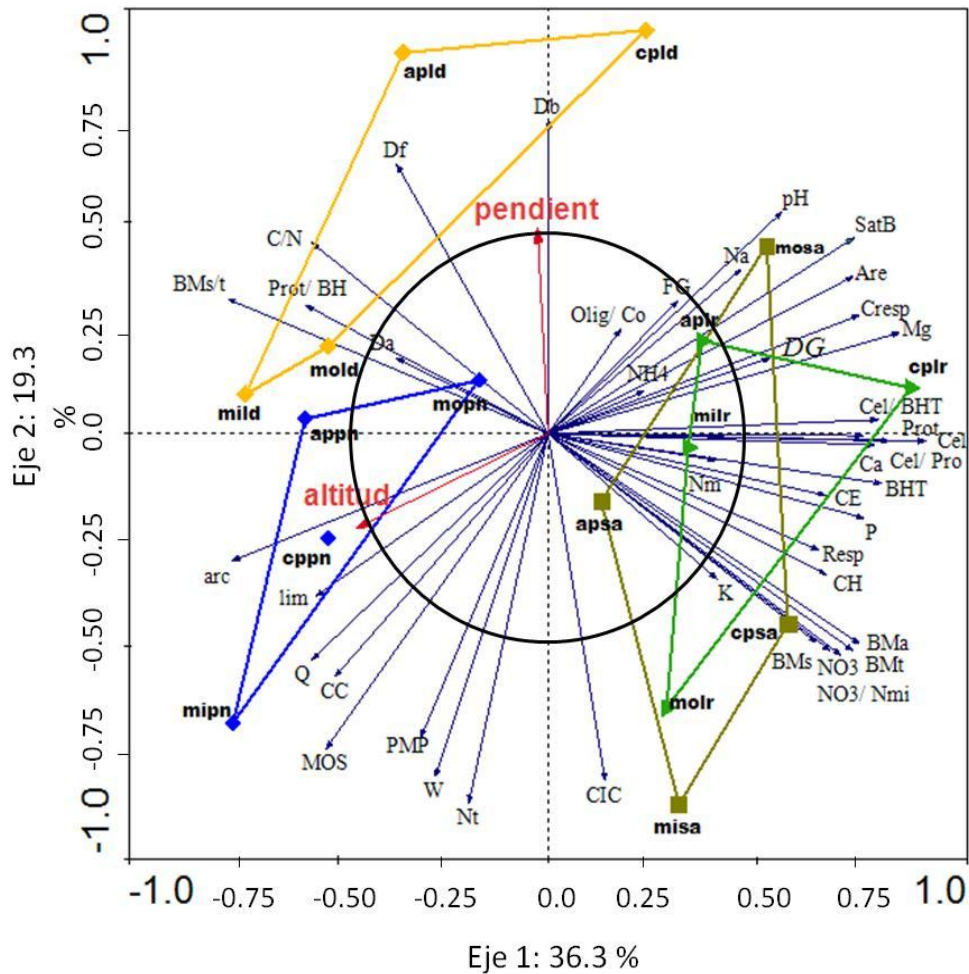


FIGURA 3.2. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando todas las variables determinadas. Se presenta el plano formado por los ejes 1 y 2. Se indica la varianza explicada por cada eje y se muestra el círculo de correlación que permite inferir qué variables tuvieron una correlación significativa con cada eje ($r > 0,4973$, $P = 0,05$, $n = 16$). Ver abreviaciones de las variables y los sitios en la Figura 3.3.

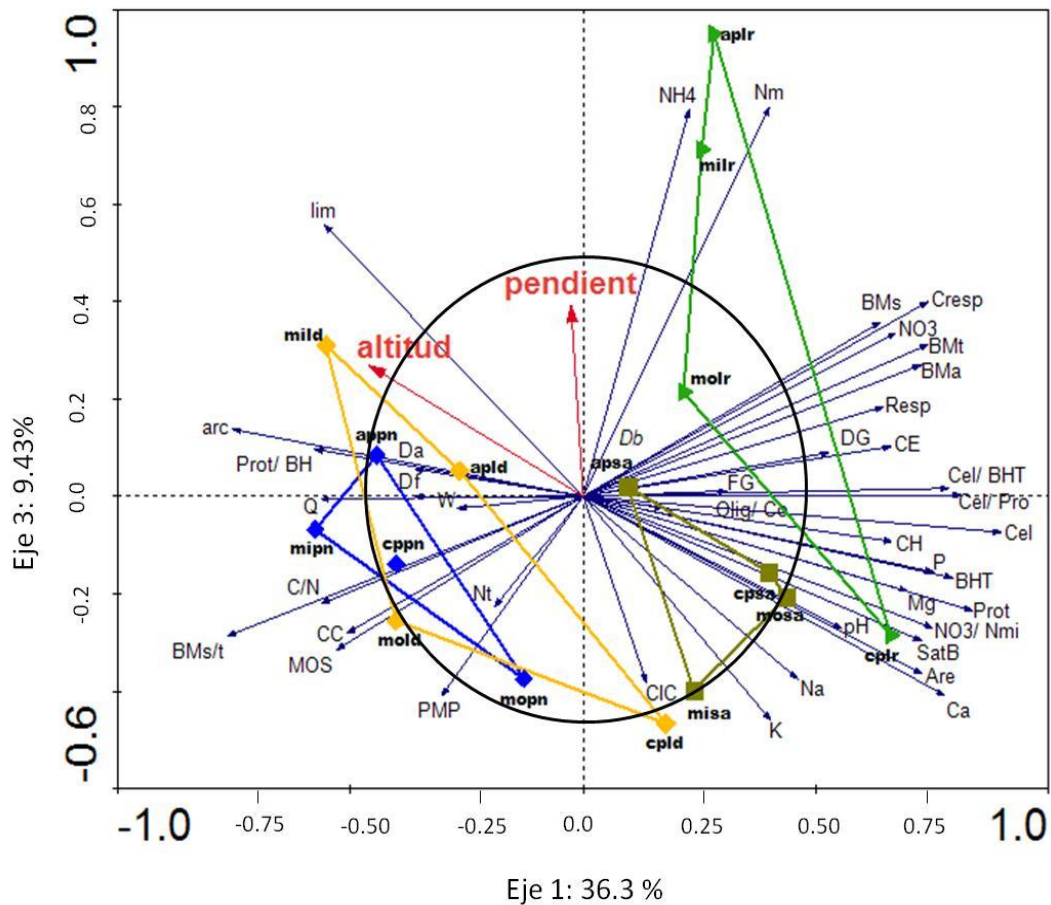


FIGURA 3.3. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando todas las variables determinadas, con los ejes 1 y 3 y la varianza explicada por cada uno. Círculo de correlación. variables: CC (capacidad de campo), PMP (punto de marchitez permanente), CH (conductividad hidráulica), W (contenido de agua gravimétrica en saturación), Q (Contenido de agua volumétrica en saturación), arc (arcilla), lim (limo), are (arena), Db (densidad aparente), Df (densidad de la fracción fina < 2mm), Da (cantidad de fracción fina por unidad de volumen), DG (densidad de la fracción gruesa >2mm), FG (porcentaje de fracción gruesa >2mm), CE (conductividad eléctrica), MOS (materia orgánica del suelo), CIC (capacidad de intercambio catiónico), P-disp (fósforo disponible), Nm (nitrógeno mineral), Nt (nitrógeno total), C/N (relación carbono: nitrógeno) BHT (bacterias heterótrofas totales), olig/cop (relación oligotrofos: copiotrofos), Prot (proteolíticos), Cel (celulolíticos), Resp (respiración), C-resp (carbono respirado por la materia orgánica del suelo), BMa (biomasa aérea del maíz), BMT (biomasa total del maíz), BMs (biomasa subterránea del maíz), BMs/t (relación biomasa subterránea: total del maíz). SITIOS: MI (Mitibobó), AP (Apios), CP (La Campana), MO (Mocao); PN (Páramo Natural), SA (Suelo Agrícola), LD (Ladera Degradada), LR (Ladera Retomada).

Se analizaron las transformaciones asociadas con cada eje chequeando las variables que mostraron correlación significativa (Tabla 3.5).

TABLA 3.5. Valores de correlación de cada variable del suelo con cada uno de los ejes del análisis de componentes principales (ACP). Con n=16, el límite de significancia es $r = 0,4973$, $P < 0.05$.

	AX1	AX2	AX3	AX4		AX1	AX2	AX3	AX4
EIG	0.3629	0.1932	0.0943	0.0702					
CC	-0.581*	-0.612*	-0.334	0.0416	Na	0.464	0.402	-0.314	0.396
PMP	-0.312	-0.599*	-0.323	0.176	SatB	0.693*	0.424	-0.212	-0.104
CH	0.617*	-0.158	0.053	0.174	NH4	0.036	0.014	0.853*	-0.028
W	-0.390	-0.746*	-0.095	-0.315	NO3	0.474	-0.487	0.273	-0.068
Q	-0.636*	-0.520*	-0.220	-0.437	Nm	0.172	-0.133	0.834*	-0.045
arc	-0.748*	-0.263	0.039	0.162	NO3/ Nmin	0.651*	-0.494	-0.181	-0.084
Are	0.812*	0.342	-0.155	-0.033	Nt	-0.283	-0.844	-0.292	-0.134
lim	-0.728*	-0.367	0.261	-0.126	C/N	-0.396	0.547*	-0.253	0.067
Db	0.102	0.678*	-0.042	0.241	BHT	0.766*	-0.164	-0.022	0.153
Df	-0.302	0.490	-0.155	-0.270	Olig/ Cop	0.283	0.126	0.073	0.202
Da	-0.365	0.029	-0.124	-0.560	Prot	0.743*	-0.057	-0.119	0.294
DG	0.487	0.207	0.116	-0.001	Cel	0.836*	-0.036	-0.006	-0.28
FG	0.338	0.393	0.103	0.610	Prot/ BHT	-0.521*	0.305	-0.064	0.146
pH	0.630*	0.409	-0.100	-0.276	Cel/ BHT	0.709*	0.048	0.033	-0.392
CE	0.619*	-0.175	0.203	0.416	Cel/ Prot	0.739*	-0.026	0.041	-0.411
CIC	0.054	-0.697*	-0.274	0.100	BMa	0.557*	-0.461	0.246	0.054
MOS	-0.560*	-0.661*	-0.381	-0.078	BMs	0.448	-0.411	0.419	0.031
P	0.714*	-0.303	-0.086	-0.301	BMt	0.556*	-0.461	0.314	0.015
Ca	0.679*	-0.021	-0.308	-0.204	BMs/t	-0.610*	0.313	-0.255	0.087
Mg	0.805*	0.343	-0.120	0.184	Resp	0.597*	-0.314	0.359	0.359
K	0.414	-0.346	-0.353	0.150	Cresp	0.698*	0.158	0.545*	0.164

maíz) (Figura 3.5 y Figura 3.6). Específicamente, en el ACP de variables químicas considerando los ejes 1 y 3 encontramos un Gradiente de intervención que además separa SA de LR, con contenidos de Nm (NO_3^- y NH_4^+) y CE, mayores en estos últimos. En el Eje 2 se observa el Gradiente de Degradación aunque no resulta tan claro como cuando se utilizan todas las variables, y está definido principalmente por el contenido de MOS y su calidad (relación C/N) (Figura 3.5).

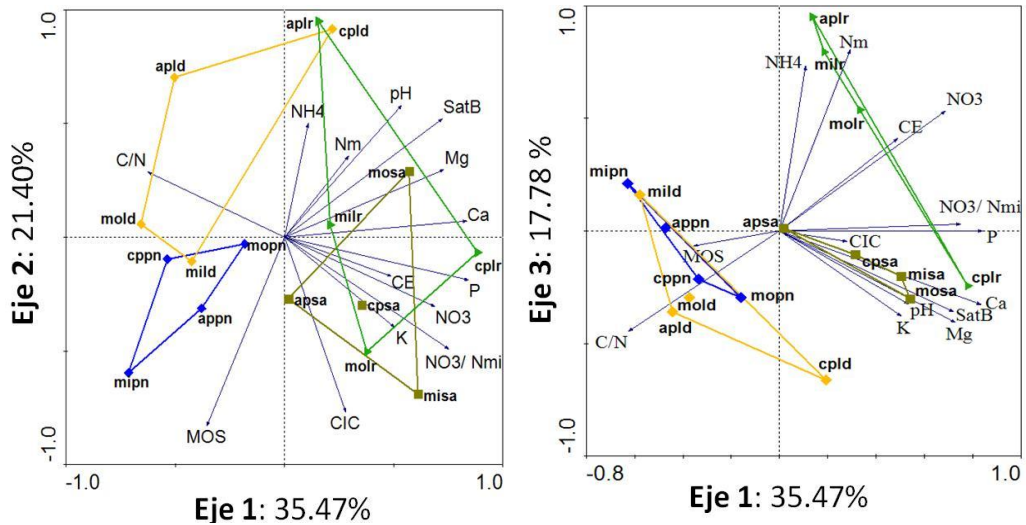


FIGURA 3.5. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables químicas del suelo, se muestran los ejes 1, 2 y 3 y la varianza explicada por cada uno.

El ACP de variables biológicas (Figura 3.6) muestra en el eje 1 el Gradiente de intervención y separa PN de LD según la relación BMs/t. Mientras que los suelos cultivados no se separan del todo, aunque se encuentran mayores valores de respiración y biomasa total de maíz para LR.

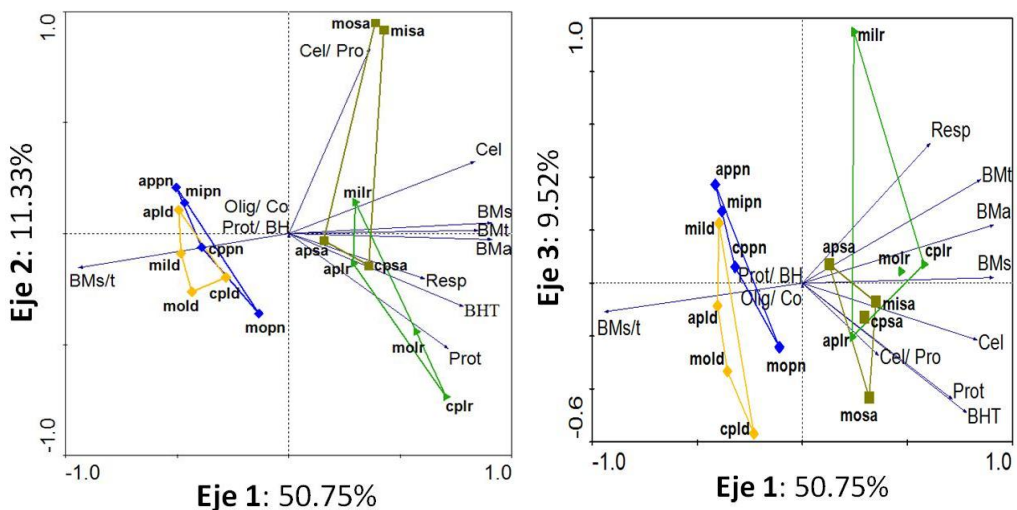


FIGURA 3.6. Ordenamiento de las 16 parcelas muestreadas con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables biológicas del suelo, se muestran los ejes 1, 2 y 3 y la varianza explicada por cada uno.

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO

3.2.1 Análisis de las variables

3.2.1.1 CORRELACIONES ENTRE VARIABLES

Observamos en las correlaciones de Pearson algunos grupos de propiedades que muestran alta correspondencia, con coeficientes de correlación significativos. Algunos de los grupos reúnen condiciones de retención de agua (CC – PMP, W – Q), fracciones finas del suelo < 2 mm (arcilla – limo – arena), algunas densidades (Da – Df), algunas bases (Ca, Mg, K, Na), suma y saturación de bases, formas de N mineral (NH₄ – NO₃ – Nm – NO₃/Nm), grupos microbiológicos (BHT – Prot – Cel), y la biomasa del maíz (BMa – BMs – BMt y BMs/t) (Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8). Estos grupos de variables pueden tener funciones similares en el suelo o complementarse entre sí por lo que resulta redundante su determinación en un estudio de la calidad del suelo.

Propiedades edáficas diferentes; físicas, químicas y biológicas, mostraron correlaciones significativas que reflejan relaciones tanto causales (por ejemplo entre C orgánico y CIC) como covarianza entre ellas (por ejemplo entre el C total y el N total). En cualquier caso si dos variables están muy correlacionadas no tendría sentido incluirlas a ambas en un índice, ya que resultarían redundantes.

En este sentido observamos un alto grado de redundancia en nuestra base de datos (Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8). Se puede recalcar correlaciones positivas entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, entre los contenidos de agua gravimétrica y volumétrica en saturación (W y Q), entre los contenidos de MOS y Nt. La arcilla y el limo se relacionan negativamente con el pH, con algunas bases (Ca, Mg), con el P disponible y con las poblaciones microbiológicas (BHT, Prot y Cel). Varias densidades (Db, Df y Da) se asocian negativamente con la capacidad de intercambio catiónico. Las poblaciones microbiológicas (BHT, Pro y Cel) se asocian positivamente con algunas bases (Ca, Mg), con el P disponible, con la suma y la saturación de bases. La relación NO₃/Nm y la respiración también muestran relaciones positivas. Finalmente encontramos fuertes correlaciones entre los contenidos de Biomasa de maíz (BMa, BMs y BMt) y poblaciones microbianas (BHT, Prot, Cel), la respiración, la conductividad hidráulica, conductividad eléctrica, el P disponible, el NO₃ y la relación NO₃/Nm; y correlación negativa con la densidad de la fracción fina del suelo y la relación C/N (Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8).

TABLA 3.6. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0. Cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.

	CC	PMP	CH	arc	Are	lim	Db	Db2	Da	Df	DG	FG	W	O	pH	CE	P	Ca	Mg	K	Na	CIC	ΣB	SatB	MOS
CC	1,00	0,76	-0,34	0,60	0,44	0,44	-0,20	0,03	0,21	0,07	-0,32	-0,29	0,50	0,58	-0,49	-0,08	-0,17	-0,25	-0,50	0,25	0,12	0,46	-0,22	-0,45	0,87
PMP	0,76	1,00	0,10	0,40	-0,33	0,17	-0,49	-0,40	-0,04	-0,36	-0,17	-0,32	0,609	0,42	-0,52	-0,06	-0,11	-0,11	-0,27	0,29	0,14	0,73	-0,06	-0,43	0,83
CH	-0,34	0,10	1,00	-0,42	0,41	-0,32	-0,45	-0,77	-0,67	-0,81	0,14	0,28	0,09	-0,41	0,22	0,36	0,40	0,56	0,56	0,54	0,21	0,43	0,64	0,33	-0,10
Arc	0,60	0,40	-0,42	1,00	0,92	0,65	-0,03	0,12	0,12	0,21	-0,64	-0,10	0,29	0,50	-0,62	-0,27	-0,59	-0,69	-0,66	0,11	0,36	0,08	-0,64	-0,73	0,61
Are	-0,33	0,41	-0,24	0,92	1,00	-0,89	0,10	-0,14	-0,24	-0,21	0,51	0,22	-0,38	-0,60	0,69	0,28	0,58	0,69	0,71	0,16	0,46	0,04	0,67	0,75	-0,59
Lim	0,44	0,17	-0,32	0,65	-0,89	1,00	-0,17	0,14	0,33	0,17	-0,25	-0,32	0,41	0,61	-0,63	-0,24	-0,46	-0,50	-0,64	0,19	0,48	0,02	-0,58	-0,63	0,45
Db	-0,20	-0,49	-0,45	-0,03	0,10	-0,17	1,00	0,65	0,14	0,66	0,29	0,52	-0,87	-0,47	0,35	0,11	-0,12	-0,10	0,26	0,20	0,37	0,61	-0,05	0,31	-0,46
Db2	0,03	-0,40	0,788	0,12	-0,14	0,14	0,654	1,00	0,75	0,98	0,06	-0,19	-0,43	0,10	0,16	-0,16	-0,18	-0,27	-0,18	0,25	0,18	0,67	-0,27	0,13	-0,23
Da	0,21	-0,04	0,671	0,12	-0,24	0,33	0,14	0,749	1,00	0,74	0,15	-0,76	0,08	0,48	-0,07	-0,22	0,00	-0,24	-0,39	0,21	0,08	0,38	-0,30	-0,06	0,06
Df	0,07	-0,36	0,806	0,21	-0,21	0,17	0,656	0,983	0,741	1,00	-0,02	-0,19	-0,40	0,16	0,14	-0,20	-0,24	-0,32	-0,23	0,26	0,11	0,63	-0,32	0,06	-0,18
DG	-0,32	-0,17	0,14	-0,37	0,505	-0,25	0,29	0,06	0,15	-0,02	1,00	0,01	-0,38	-0,35	0,29	0,41	0,48	0,37	0,45	0,07	0,28	0,07	0,37	0,45	-0,36
FG	-0,29	-0,32	0,28	-0,10	0,22	-0,32	0,524	-0,19	-0,756	-0,19	0,01	1,00	-0,62	-0,70	0,27	0,28	-0,09	0,14	0,49	0,06	0,32	0,09	0,23	0,26	-0,35
W	0,50	0,609	0,09	0,29	-0,38	0,41	-0,871	-0,43	0,08	-0,40	-0,38	-0,38	1,00	0,81	-0,52	-0,28	-0,08	-0,06	-0,42	0,03	0,49	0,63	-0,15	-0,47	0,70
O	0,584	0,42	-0,41	0,50	-0,601	0,607	-0,47	0,10	0,48	0,16	-0,35	-0,35	0,808	1,00	-0,51	-0,44	-0,25	-0,28	-0,61	0,16	0,52	0,32	-0,38	-0,53	0,69
pH	-0,49	-0,18	0,22	-0,623	0,688	-0,629	0,35	0,16	-0,07	0,14	0,29	0,27	-0,523	-0,514	1,00	0,03	0,39	0,67	0,56	0,24	0,31	0,24	0,63	0,79	-0,53
CE	-0,08	-0,06	0,36	-0,27	0,26	-0,24	0,11	-0,16	-0,22	-0,20	0,41	0,28	-0,28	-0,44	0,03	1,00	0,63	0,25	0,46	0,53	0,51	0,13	0,42	0,28	-0,27
P	-0,17	-0,11	0,40	-0,586	0,579	-0,46	-0,12	-0,18	0,00	-0,24	0,48	-0,09	-0,08	-0,25	0,39	0,633	1,00	0,60	0,44	0,50	0,26	0,19	0,63	0,48	-0,18
Ca	-0,25	-0,11	0,584	0,689	0,694	-0,564	-0,10	-0,27	-0,24	-0,32	0,37	0,14	-0,06	-0,28	0,665	0,25	0,601	1,00	0,77	0,48	0,47	0,34	0,97	0,83	-0,24

TABLA 3.7. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0. Cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.

	NH4	NO3	Nmi	NO3/	Nmin	Nr	CN	BHT	Olig/	Cop	Prot	Cel	Prot/	Cell/	BHT	BMa	BMt	Res	p	Cresp	BMs	BMt	Cell/	Prot
CC	-0,33	-0,17	-0,34	-0,01	0,80	-0,04	-0,29	-0,25	-0,27	-0,44	0,14	-0,42	0,24	-0,04	-0,52	-0,16	0,24	-0,04	0,24	-0,04	-0,19	-0,16	-0,44	-0,44
PMP	-0,40	-0,07	-0,37	0,16	0,78	-0,13	-0,09	-0,28	-0,08	-0,28	-0,02	-0,32	0,14	0,04	-0,50	-0,01	0,14	0,04	0,14	0,04	0,04	-0,02	-0,30	-0,30
CH	0,14	0,47	0,26	0,54	0,11	-0,39	0,46	-0,18	0,41	0,60	-0,38	0,55	-0,49	0,37	0,29	0,54	-0,49	0,37	0,29	0,66	0,57	0,57	0,57	0,57
arc	-0,08	-0,42	-0,20	-0,34	0,43	0,14	-0,56	-0,25	-0,61	-0,69	0,28	-0,67	0,32	-0,12	-0,44	-0,40	0,32	-0,12	-0,44	-0,44	-0,41	-0,43	-0,65	-0,65
Are	-0,10	0,23	-0,02	0,33	-0,45	-0,10	0,59	0,31	0,64	0,64	-0,32	0,57	-0,19	0,20	0,45	0,26	-0,19	0,20	0,45	0,26	0,26	0,27	0,57	0,57
lim	0,29	0,04	0,27	-0,26	0,38	0,05	-0,51	-0,33	-0,55	-0,46	0,31	-0,34	0,01	-0,26	-0,37	-0,03	0,01	-0,26	-0,37	-0,03	-0,03	-0,03	-0,37	-0,37
Db	-0,08	-0,32	-0,17	-0,23	-0,49	0,23	-0,14	0,03	-0,04	-0,06	0,25	0,00	0,07	-0,01	0,23	-0,28	0,07	-0,01	0,23	-0,38	-0,27	-0,27	-0,06	-0,06
Db2	-0,12	-0,47	-0,24	-0,47	-0,38	0,46	-0,37	0,21	-0,28	-0,24	0,40	-0,15	0,27	-0,40	-0,06	-0,50	0,27	-0,40	-0,06	-0,64	-0,51	-0,51	-0,21	-0,21
Da	-0,07	-0,26	-0,14	-0,28	0,00	0,16	-0,28	0,18	-0,24	-0,13	0,30	-0,08	0,13	-0,33	-0,14	-0,31	0,13	-0,33	-0,14	-0,45	-0,32	-0,32	-0,11	-0,11
Df	-0,15	-0,50	-0,28	-0,44	-0,34	0,47	-0,34	0,21	-0,28	-0,28	0,33	-0,22	0,27	-0,40	-0,10	-0,53	0,27	-0,40	-0,10	-0,71	-0,55	-0,55	-0,26	-0,26
DG	0,12	0,40	0,22	0,18	-0,21	-0,18	0,27	0,16	0,40	0,41	0,05	0,47	-0,32	0,31	0,39	0,44	-0,32	0,31	0,39	0,46	0,48	0,48	0,40	0,40
FG	0,06	0,05	0,06	0,09	-0,32	0,00	0,13	-0,16	0,15	0,07	-0,08	0,07	-0,10	0,26	0,27	0,12	-0,10	0,26	0,27	0,16	0,13	0,13	0,06	0,06
W	-0,05	0,25	0,03	0,18	0,64	-0,09	0,00	-0,12	-0,15	-0,14	-0,25	-0,17	0,01	-0,15	-0,48	0,18	0,01	-0,15	-0,48	0,16	0,13	0,13	-0,12	-0,12
Q	-0,18	0,01	-0,15	-0,06	0,52	0,21	-0,25	-0,05	-0,36	-0,36	-0,03	-0,35	0,18	-0,38	-0,63	-0,10	0,18	-0,38	-0,63	-0,23	-0,16	-0,16	-0,31	-0,31
pH	0,12	-0,05	0,10	0,17	-0,42	0,01	0,39	0,02	0,34	0,65	-0,38	0,64	-0,19	0,03	0,44	-0,05	-0,19	0,03	0,44	-0,04	0,00	0,00	0,65	0,65
CE	0,06	0,58	0,22	0,54	0,02	-0,52	0,53	0,42	0,61	0,42	-0,16	0,31	-0,63	0,84	0,65	0,71	-0,63	0,84	0,65	0,55	0,70	0,70	0,29	0,29
P	-0,12	0,59	0,07	0,72	0,17	-0,63	0,53	0,22	0,52	0,74	-0,32	0,68	-0,60	0,60	0,49	0,64	-0,60	0,60	0,49	0,55	0,67	0,67	0,69	0,69
Ca	0,00	0,41	0,12	0,55	-0,04	-0,32	0,71	0,01	0,68	0,80	-0,58	0,69	-0,46	0,25	0,35	0,42	-0,46	0,25	0,35	0,35	0,35	0,43	0,73	0,73

TABLA 3.8. Prueba de correlación de Pearson, SPSS 17.0, cuadros verde oscuro correlaciones significativas altas, cuadros verde claro correlaciones significativas bajas.

	Na	CIC	ZB	SatB	MOS	NH4	NO3	Nmin	Nmin	Nt	C/N	BHT	Cop	Prot	Prot	Cel	Prot/ BHT	Cel/ BHT	BMs/ BMT	BMA	BMT	Rsp	Crsp	BMs	BMT	Cel/ Prot
Mg	0,68	0,06	0,82	0,84	-0,55	0,03	0,37	0,13	0,51	-0,35	-0,26	0,68	0,04	0,66	0,75	-0,50	0,66	0,44	-0,57	0,40	0,56	0,34	0,43	0,67		
K	0,40	0,47	0,64	0,28	0,25	-0,23	0,20	-0,14	0,48	0,42	-0,26	0,37	0,06	0,45	0,39	-0,17	0,29	0,31	-0,32	0,37	0,12	0,24	0,33	0,29		
Na	1,00	-0,16	0,597	0,74	-0,40	-0,12	-0,05	-0,12	0,11	-0,31	-0,08	0,39	0,27	0,59	0,37	0,04	0,28	0,07	-0,16	0,31	0,44	-0,07	0,04	0,23		
CIC	-0,16	1,00	0,36	-0,19	0,64	-0,28	0,40	-0,13	0,51	0,68	-0,26	0,37	-0,12	0,28	0,05	-0,44	-0,08	0,43	-0,19	0,23	-0,30	0,40	0,40	-0,01		
ZB	0,597	0,36	1,00	0,83	-0,23	-0,05	0,40	0,07	0,60	-0,01	-0,34	0,73	0,04	0,72	0,80	-0,53	0,68	0,46	-0,52	0,36	0,40	0,36	0,46	0,71		
SatB	0,736	-0,19	0,827	1,00	-0,59	0,10	0,14	0,13	0,27	-0,43	-0,14	0,56	0,12	0,60	0,76	-0,33	0,71	0,17	-0,35	0,20	0,55	0,09	0,19	0,70		
MOS	-0,40	0,637	-0,23	-0,590	1,00	-0,42	-0,10	-0,40	0,07	0,89	0,05	-0,35	-0,39	-0,39	-0,41	0,09	-0,36	-0,10	0,26	-0,18	0,74	-0,06	-0,11	-0,36		
NH4	-0,12	-0,28	-0,06	0,10	-0,42	1,00	0,24	0,96	-0,21	-0,33	-0,22	0,11	-0,03	0,03	0,19	-0,15	0,22	0,18	-0,28	0,22	0,57	0,33	0,25	0,22		
NO3	-0,05	0,40	0,40	0,14	-0,10	0,24	1,00	0,51	0,72	0,19	-0,56	0,57	0,11	0,47	0,54	-0,49	0,48	0,98	-0,78	0,54	0,36	0,86	0,96	0,51		
Nmin	-0,12	-0,13	0,07	0,13	-0,40	0,959	0,509	1,00	0,03	-0,23	-0,36	0,27	0,01	0,17	0,33	-0,29	0,33	0,45	-0,48	0,35	0,61	0,54	0,50	0,35		
NO3/Nmin	0,11	0,508	0,800	0,27	0,07	-0,21	0,719	0,03	1,00	0,41	-0,64	0,66	-0,06	0,51	0,71	-0,69	0,58	0,76	-0,80	0,56	0,28	0,54	0,73	0,65		
n	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565		
Nt	-0,31	0,678	-0,01	-0,43	0,889	-0,33	0,19	-0,23	0,41	1,00	-0,39	-0,12	-0,44	-0,19	-0,07	-0,08	-0,06	0,21	-0,12	0,14	-0,44	0,21	0,22	-0,04		
C/N	-0,08	-0,26	-0,34	-0,14	0,05	-0,22	-0,568	-0,36	-0,642	-0,39	1,00	-0,43	0,13	-0,36	0,54	0,35	-0,42	-0,61	0,69	-0,74	-0,54	-0,57	-0,64	-0,48		
BHT	0,39	0,37	0,725	0,566	-0,35	0,11	0,572	0,27	0,864	-0,12	-0,43	1,00	0,44	0,93	0,69	-0,76	0,40	0,61	-0,62	0,57	0,59	0,34	0,55	0,50		
Olig/Cop	0,27	-0,12	0,04	0,12	-0,39	-0,03	0,11	0,01	-0,06	-0,44	0,13	0,44	1,00	0,56	-0,02	-0,02	-0,23	0,14	0,03	0,27	0,36	-0,10	0,06	-0,20		
Prot	0,585	0,28	0,722	0,598	-0,39	0,03	0,47	0,17	0,507	-0,19	-0,36	0,932	0,560	1,00	0,58	-0,49	0,30	0,53	-0,46	0,56	0,58	0,29	0,47	0,36		
Cel	0,37	0,05	0,802	0,762	-0,41	0,19	0,536	0,33	0,710	-0,07	-0,539	0,685	-0,02	0,577	1,00	-0,62	0,93	0,56	-0,76	0,46	0,63	0,46	0,58	0,97		
Prot/BHT	0,04	-0,44	-0,532	-0,33	0,09	-0,15	-0,49	-0,29	-0,686	-0,08	0,35	0,764	-0,02	-0,49	-0,621	1,00	-0,43	-0,47	0,61	-0,36	-0,34	-0,28	-0,43	-0,57		
Cel/BHT	0,28	-0,08	0,882	0,708	-0,36	0,22	0,48	0,33	0,578	-0,06	-0,42	0,40	-0,23	0,30	0,26	0,43	1,00	0,49	-0,66	0,30	0,50	0,51	0,55	0,98		
BMA	0,07	0,43	0,46	0,17	-0,10	0,18	0,978	0,45	0,763	0,21	-0,605	0,606	0,14	0,531	0,562	-0,47	0,49	1,00	-0,82	0,65	0,43	0,87	0,99	0,51		
BMs/BMT	-0,16	-0,19	-0,518	-0,35	0,26	-0,28	-0,776	-0,48	-0,797	-0,12	-0,686	-0,622	0,03	-0,46	-0,757	0,614	-0,663	-0,815	1,00	-0,63	-0,60	-0,62	-0,81	-0,71		
Rsp	0,31	0,23	0,36	0,20	-0,18	0,22	0,536	0,35	0,562	0,14	-0,741	0,589	0,27	0,557	0,46	-0,36	0,30	0,653	-0,629	1,00	0,74	0,55	0,66	0,34		
Crsp	0,44	-0,30	0,40	0,553	-0,738	0,565	0,36	0,608	0,28	-0,44	-0,543	0,589	0,36	0,582	0,629	-0,34	0,500	0,43	0,598	0,736	1,00	0,36	0,46	0,53		
BMs	-0,07	0,40	0,36	0,09	-0,06	0,33	0,856	0,542	0,544	0,21	-0,572	0,34	-0,10	0,29	0,46	-0,28	0,508	0,871	0,618	0,554	0,36	1,00	0,93	0,48		
BMT	0,04	0,40	0,46	0,19	-0,11	0,25	0,964	0,503	0,732	0,22	-0,642	0,545	0,06	0,47	0,581	-0,43	0,549	0,985	-0,810	0,661	0,46	0,926	1,00	0,55		

3.2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLES

El análisis de clasificación de las variables, realizado según sus distancias euclidianas, arrojó cinco grupos de variables al hacer el corte en el 50% de similitud (Figura 3.7). El porcentaje de encadenamiento de este análisis de clúster fue 3,27%.

Al estudiar la clasificación obtenida se encontró un primer grupo que incluye las variables CC, MOS, Nt, PMP, CIC, W, Q, arc y Lim, las cuales tienen a estar altamente correlacionadas entre sí y relacionadas con el almacenamiento de agua y nutrientes del suelo y son las mismas variables que presentan valores altos en los PN en el ACP (Figura 3.2 y Figura 3.3).

El grupo 2 agrupó a las variables Df, Da, C/N, BMs/t, Prot/BHT, asociadas a la baja calidad del suelo, la poca disponibilidad de nutrientes y los contenidos de fracción fina en el suelo, valores altos de estas variables pueden relacionarse con LD en el ACP (Figura 3.2 y Figura 3.3).

El grupo 3 (CH, K, P, NO₃, NO₃/Nm, Cel, Cel/BHT, Cel/Prot, BMa, BMs y BMt) reunió variables asociadas directamente con la productividad, la disponibilidad de algunos nutrientes, el movimiento de agua dentro del suelo y parte de la actividad microbiana del mismo, reflejando la asociación positiva con suelos que reciben manejo agrícola.

El grupo 4 (CE, Resp, C-resp, BHT, Prot, Oligo/Copiotrofos, NH₄ y Nm) reúne gran parte de la actividad microbiana de los suelos y algunas formas disponibles de nitrógeno, asociado con suelos que reciben un manejo agrícola.

Finalmente en el grupo 5 (Are, pH, Ca, Mg, SatB, Na, DG, Db y FG) se encontraron variables asociadas al estatus nutricional del suelo, su condición de disponibilidad para las plantas y algunas condiciones sobre el estado físico del suelo.

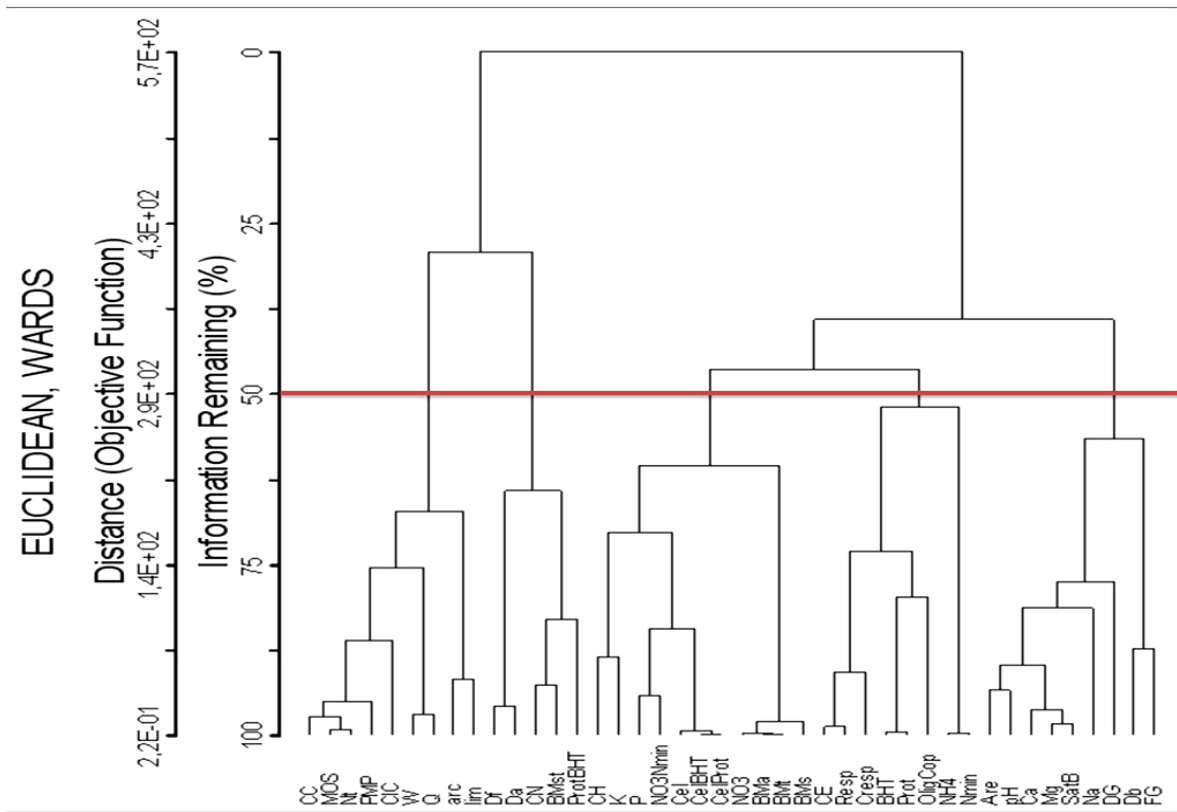


FIGURA 3.7. Clasificación de las variables. Se utilizó la distancia euclidiana y el método de agrupación fue Wards. Se muestra con la línea roja el nivel en el que se hizo el corte para considerar los grupos de variables.

Partiendo de todo el análisis anterior y un entendimiento general del funcionamiento de los suelos según los análisis de varianza, multivariados, análisis de correlación y clúster, se proponen algunos índices, como herramientas para la evaluación de la calidad de los suelos del páramo venezolano, ubicados dentro del bolsón seco de Mucuchíes. Para la construcción de estos, se excluyó la localidad Mocoa, ya que el PN resultó ser una LD. Sin embargo, la estadística utilizada no nos permite eliminar una sola parcela sino que hay que eliminar todo el sitio para poder hacer el Permanova de dos vías que nos permite minimizar la variabilidad atribuida a la localidad y reconocer diferencias significativas entre los tratamientos (PN, SA, LD y LR).

3.2.2 Índice de Fertilidad del Suelo

El Índice de Fertilidad, que relaciona la biomasa aérea del maíz obtenida en el experimento de fertilidad con todas las variables edáficas, arrojó la Ecuación:

$$\text{IFS} = (0,076 \cdot \text{NO}_3) + (0,507 \cdot \text{CE}) + (0,09 \cdot \text{CH}) + (0,11 \cdot \text{PMP}) + 0,133$$

En la Tabla 3.9, el valor de R^2 refleja la variabilidad de la biomasa aérea (variable independiente considerada en esta prueba) explicada por cada indicador o variable independiente; de lo que podemos notar que el 95,7% de la variabilidad de la BMA (o IFS) es explicado por el contenido de NO_3^- en los suelos. También puede observarse el aumento del R^2 con la introducción de cada uno de los indicadores arrojados por la regresión; encontrando que el incremento del R^2 a partir del segundo indicador, es muy pequeño, por lo que se asume que el contenido de NO_3^- es la propiedad mejor relacionada con la fertilidad del suelo. Los resultados obtenidos al aplicar esta ecuación a las parcelas de cada historia de uso se muestran en la Tabla 3.10, los valores más altos correspondieron a los SA y LR. No se reconocen diferencias entre el PN y LD. Además separó SA de LR, con valores significativamente mayores para LR. Esto se debe a los altos niveles de NO_3^- y la alta conductividad eléctrica en estas LR. Se observó mejor infiltración en los SA y la mayor capacidad de retener agua es para el PN aunque no se observan diferencias significativas.

TABLA 3.9. Valor del R^2 y R^2 acumulado con cada uno de los indicadores considerados por la regresión múltiple arrojada.

	Puntaje NO_3	Puntaje CE	Puntaje CH	Puntaje PMP
R^2 acumulado	0,957	0,987	0,992	0,995
Incremento del R^2	0,957	0,030	0,006	0,003

TABLA 3.10. Resultados del índice de fertilidad del suelo, para cada tratamiento (PN- páramo natural, SA- suelo agrícola, LD- ladera degradada y LR- ladera retomada) y resultados del IFS con análisis de varianza de dos vías (grupos mostrados con letras a>b>c).

	Puntaje NO_3	Puntaje CE	Puntaje CH	Puntaje PMP	IFS
PN	0,87±0,04	0,43±0,00	1,09±0,35	2,43±0,52	4,82±0,86c
SA	1,82±0,29	0,51±0,01	1,99±1,01	2,09±0,35	6,40±0,74b
LD	0,84±0,00	0,43±0,00	1,04±0,23	1,77±0,30	4,08±0,56 c
LR	2,24±0,64	0,75±0,23	1,67±0,42	1,83±0,28	6,48±0,63a

3.2.3 Índice de Degradación del Suelo

Los indicadores considerados para el Índice de Degradación se muestran en la Tabla 3.11, asociados al gradiente de degradación observado en el Eje 2 del ACP completo (Figura 3.2). La estandarización de cada indicador se obtuvo de la ecuación de la recta que se muestra en la Figura 3.8 y Figura 3.9.

TABLA 3.11. Indicadores seleccionados para evaluar el IDS, se muestra la tendencia de estos indicadores, una ecuación lineal para la estandarización de cada uno y el peso relativo que se le asignó, los cuales suman 1 en total.

Indicadores Básicos	Tendencia	Ec. estandarización	Peso relativo
Arcilla	Más mejor	$Y = 0,0458x - 0,0239$	0,2
CIC	Más mejor	$Y = 0,1658x - 0,3134$	0,2
MOS	Más mejor	$Y = 0,0971x - 0,3176$	0,2
C/N	Menos mejor	$Y = -0,0461x + 1,5749$	0,2
Db	Menos mejor	$Y = -1,4549x + 2,3057$	0,2

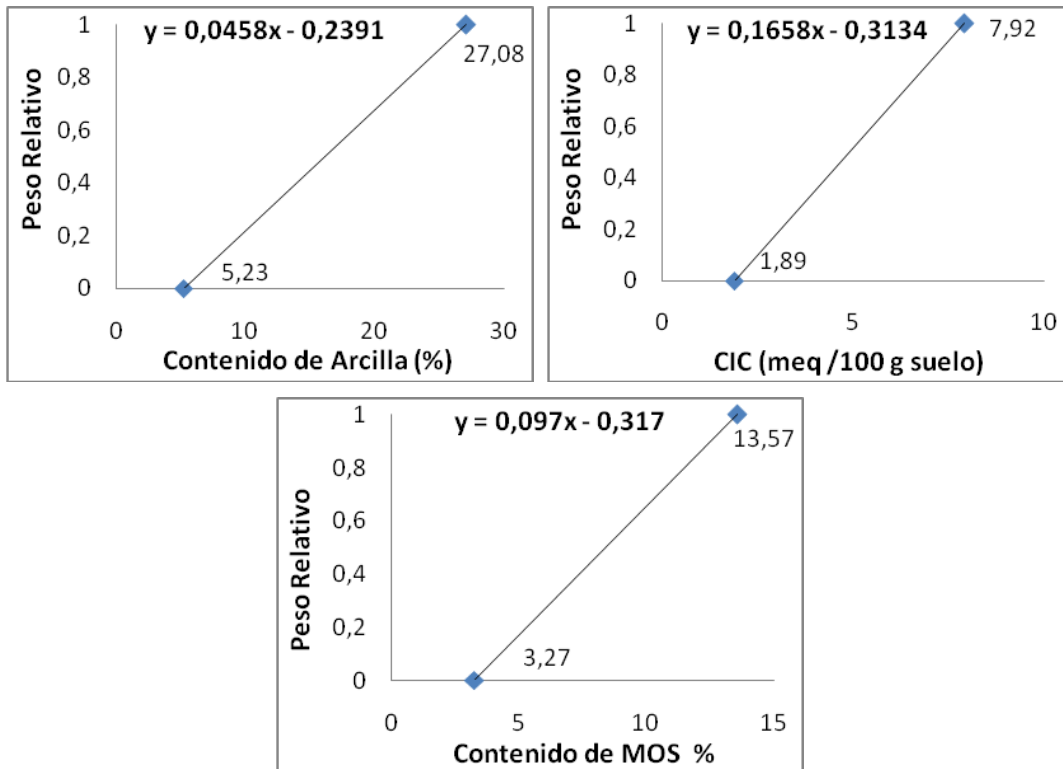


FIGURA 3.8. Ecuaciones lineales obtenidas de la estandarización de cada indicador seleccionado para evaluar el IDS. Se muestran los indicadores del tipo “más es mejor”. Los puntos azules corresponden al mínimo y máximo valor obtenido para la variable, restando o sumando 10% respectivamente.

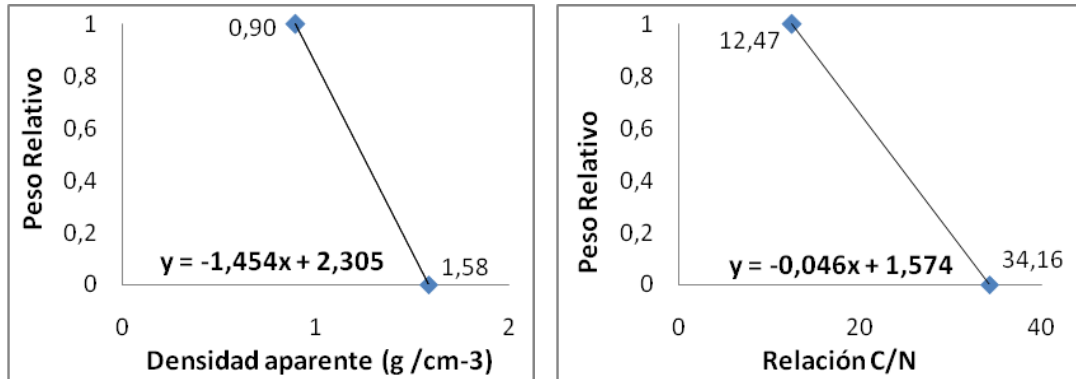


FIGURA 3.9. Ecuaciones lineales obtenidas de la estandarización de cada indicador seleccionado para evaluar el IDS. Se muestran los indicadores del tipo “menos es mejor”. Los puntos azules corresponden al mínimo y máximo valor obtenido para la variable, restando o sumando 10% respectivamente.

Los resultados obtenidos al aplicar el Índice de degradación a cada suelo, se muestran en la Tabla 3.12 donde se incluyen los resultados para cada indicador, para el índice completo y la prueba estadística que refleja diferencias significativas entre los tratamientos. Al analizar los indicadores del tipo menos es mejor (C/N y Db), debe considerarse que un aumento en su puntaje relativo (el valor arrojado en el índice) refleja una disminución de dicha variable en el suelo. Encontramos entonces en PN los menores valores para el índice (menor degradación), debido a sus altos contenidos de arcilla y MOS, alta CIC, bajas densidades y una relación C/N intermedia. Las LD en el otro extremo, con los puntajes más altos del índice (mayor degradación), muestran los menores contenidos de MOS, una alta relación C/N, las menores CIC y las mayores densidades. En el medio de estos extremos encontramos los suelos cultivados; donde las LR se ubican por encima de los SA, reflejando una mayor degradación, estos SA muestran pérdidas de MOS y de arcilla, sin embargo tienen las más altas CIC y sus densidades son las menores. Por su parte, las LR muestran los menores valores de MOS y bajas CIC, aunque estas últimas parecen recuperarse respecto a lo encontrado en LD, así como la densidad que parece disminuir en LR respecto a LD, encontramos en estos suelos los puntajes más altos para la relación C/N, que estarán reflejando una disminución en los contenidos relativos de N respecto al contenido de C. Finalmente se observan altos contenidos de arcilla en el PN, contrario a los demás tratamientos donde al parecer hubo pérdidas de la fracción más fina del suelo.

TABLA 3.12. Pesos relativos obtenidos por cada indicador y resultado final del índice de degradación edáfico, con análisis de las diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados para el IDS. Considerando a>b>c.

	PN	SA	LD	LR
Arcilla	0,20±0,02	0,11±0,03	0,11±0,06	0,11±0,02
CIC	0,11±0,03	0,15±0,02	0,03±0,02	0,08±0,03
MOS	0,15±0,03	0,11±0,05	0,05±0,03	0,03±0,02
Db	0,10±0,03	0,12±0,07	0,06±0,03	0,08±0,03
C/N	0,13±0,01	0,16±0,00	0,09±0,06	0,17±0,01
Suma pesos de Indicadores	0,69	0,64	0,35	0,47
IDS (1-suma)	0,31±0,13c	0,36±0,19bc	0,65±0,21a	0,53±0,10ab

3.2.4 Índice Integrado de Calidad del Suelo

3.2.4.1 ASIGNACIÓN DE FUNCIONES DEL SUELO Y SUS RESPECTIVOS INDICADORES

La selección de los indicadores de cada función del suelo se realizó en base a la bibliografía y además se consideró la asociación de las variables con los diferentes ejes de ordenamiento del ACP, la clasificación, las correlaciones de Pearson y las diferencias de las variables entre los tratamientos (Permanovas).

Así pues, se consideró para funciones como retener agua y nutrientes y resistir la degradación, únicamente indicadores físicos y químicos, que nos permiten evaluar el estado de degradación (o el inverso, el estado de conservación) del suelo (*Karlen y col, 1998; Islam y Weil, 2000; Cantú y col, 2007*), sin incluir aquellas propiedades que se ven moduladas por la intervención antrópica, como las variables biológicas y algunas químicas que reflejan claramente el efecto del manejo agrícola sobre el suelo.

Estas variables químicas y biológicas, cambian casi inmediatamente ante el manejo e influyen favorablemente en la fertilidad del suelo; así que fueron incluidas en la función de acondicionamiento para el desarrollo óptimo de la vegetación, donde es considerada la intervención antrópica que tiende a mejorar el estado del suelo para las plantas cultivadas (*Islam y Weil, 2000*). Dicha distribución inicial de variables fue producto de los ordenamientos observados en cada uno de los ejes del ACP completo (Figura 3.2 y Figura 3.3) y en los análisis de varianza que reflejaron variables con diferentes tasas de cambios (Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3).

Un resumen con los indicadores seleccionados para cada función, y las funciones consideradas se muestran en la Tabla 3.13 donde se señalan también las tendencias que tienen dentro de la función en la que se encuentran, su peso relativo y el indicador sustituto que se propone en base a las correlaciones de Pearson.

TABLA 3.13. Distribución de los indicadores en las funciones del suelo, tendencias y correlaciones entre ellos, pesos relativos de cada indicador. Peso total de cada función.

Función Nivel 1	Función Nivel 2	Indicadores Básicos (IB)	Tendencia	Indicador Sustituto (IS)	Tendencia	Correlación IB - IS	Peso
Capacidad de Retención de Agua y Nutrientes	-	MOS	Más mejor	CC CIC	Más mejor Más mejor	0,869** 0,637**	0,6
		Arcilla	Más mejor	Arena	Menos mejor	- 0,924**	0,2
		pH	Menos mejor	Sat Bases	Menos mejor	0,788**	0,2
Resistencia a la degradación	Infiltración	Db	Menos mejor	Df	Menos mejor	0,656**	0,4
		CH	Más mejor	Da	Menos mejor	- 0,671**	0,4
		MOS	Más mejor	CC	Más mejor	0,869**	0,2
	Almacenamiento de C	MOS	Más mejor	-	-	-	0,6
		C/N	Más mejor Max 20	-	-	-	0,2
		Resp	Menos mejor	-	-	-	0,2
Condiciones Óptimas para el Desarrollo Vegetal	Ambiente Físico	Db	Menos mejor	W	Más mejor	- 0,871**	0,5
		Da	Menos mejor	CH	Más mejor	- 0,671**	0,5
	Disponibilidad de Nutrientes	Nmin	Más mejor Máx 15 mg Kg ⁻¹	NO ₃	Más mejor	0,509*	0,3
		P disp	Más mejor	CE	Más mejor	0,633**	0,25
		K disp	Más mejor	CE	Más mejor	0,527*	0,25
		pH	Más mejor	Ca	Más mejor	0,665**	0,2

3.2.4.1.1 FUNCIÓN 1. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA Y NUTRIENTES

Esta función está representada por algunas de las variables mostradas en el Grupo 1 del dendrograma (Figura 3.7); como el contenido de arcilla que incide positivamente en la capacidad de atraer cationes como Ca⁺⁺ y Mg⁺ debido a sus cargas negativas y en la retención de agua por su alta relación superficie/volumen y el mayor número de micro-poros presentes. La MOS también provee buenas condiciones para almacenar agua y nutrientes por su textura coloidal y sus cargas negativas, ambas variables del tipo más es mejor. El pH se considera el pH un indicador del tipo menos es mejor para esta función particular principalmente por su papel en la retención de N (pH ácidos inhiben la nitrificación), además regula muchos otros ciclos de nutrientes en el suelo como con el P (está

disponible para la vegetación en suelos de pH neutro), por otra parte los suelos ácidos tienden a acumular los nutrientes y evitar que se pierdan por lavado o por absorción vegetal (Karlen y col, 1994; Brady y Weil, 1999; Amacher y col, 2007). Se proponen la CC y CIC como sustitutos de MOS ($r=0,869^{**}$ y $0,637^{**}$ respectivamente), pues altas CIC reflejan una mayor retención potencial de cationes y mejor capacidad buffer del suelo y altas CC representan un mayor espacio para almacenar el agua disponible para las plantas. Como sustituto de la arcilla, se propuso la Arena con $r=-0,924^{**}$, esta relación es inversa ya que la arena provee mejores condiciones de aireación y por tanto menor retención de agua, facilitando además la mineralización de la MOS. La Saturación de Bases en lugar del pH con $r=0,788^{**}$ por su alta correlación, además bajos valores de Saturación de bases implican la dominancia de H^+ y Al^{+3} en el complejo de intercambio y por lo tanto pH más bajo (Brady y Weil, 1999; Abadín y col, 2002; Arshad y Martin, 2002).

3.2.4.1.2 FUNCIÓN 2. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN

3.2.4.1.2.1 FUNCIÓN 2.1. INFILTRACIÓN

El proceso de infiltración está representado principalmente por la conductividad hidráulica que refleja la entrada de agua en el sistema, minimizando a su vez la escorrentía y por tanto la erosión. La estructura del suelo mejora significativamente la infiltración, y esta está influenciada en gran parte por los contenidos de MOS, que favorece la formación de agregados por su naturaleza coloidal, disminuye la compactación y aumenta los contenidos potenciales de agua en este compartimiento; ambos indicadores son considerados más es mejor. También la Densidad aparente (D_b) es indicador del tipo menos es mejor, ya que suelos con mayor compactación muestran una pérdida posterior de la estructura, dificultando la entrada del agua al suelo; por el contrario, las bajas densidades reflejan un mayor volumen potencial para almacenar agua y mejor drenaje en condiciones de alta precipitación o irrigación (Karlen y col, 1994; Brady y Weil, 1999; Glover y col, 2000; Arshad y Martin, 2002).

Como sustituto de la densidad aparente se propuso la densidad de la fracción fina (D_f) con $r=0,656^{**}$, donde el aumento de la densidad de la fracción fina origina una disminución de los macro -poros presentes en el suelo y por tanto un aumento de la densidad aparente, considerada entonces como menos es mejor. La MOS es sustituida por la CC con $r=0,869^{**}$, pues la capacidad de campo refleja el contenido de agua que se puede movilizar dentro del suelo, manteniendo la tendencia de más es mejor y finalmente la conductividad hidráulica se sustituyó por el contenido de fracción fina por unidad de volumen total (D_a) con $r=-0,671^{**}$, esta relación negativa muestra que el flujo de agua resulta mejor cuando la fracción fina ($< 2mm$) es menor, por tanto el contenido de fracción fina por unidad de volumen total se considera un indicador menos es mejor.

3.2.4.1.2.2 FUNCIÓN 2.2. ALMACENAMIENTO DE C

El almacenamiento de C se asocia directamente con el contenido de MOS que está formado principalmente por C orgánico; otro indicador de esta función es la relación C/N que nos permite monitorear la dinámica de la MOS, considerando que altas relaciones implican una MOS recalcitrante y de lenta descomposición, lo que colabora con el almacenamiento del C; ambos indicadores considerados más es mejor; sin embargo el segundo fue establecido con un valor máximo en 20 debido a los valores muy altos observados en algunas de las muestras evaluadas. La respiración

también juega un papel importante en el almacenamiento de C, por representar una de las vías de pérdida de C en forma de CO₂; por tanto es considerada como menos es mejor (*Brady y Weil, 1999; Glover y col, 2000; Arshad y Martin, 2002*). Esta función no muestra un grupo de indicadores sustitutos debido a que no se determinaron variables que se asocien bien con ellas considerando su papel dentro de la función de almacenar C. Por lo que resulta un poco inflexible su determinación.

3.2.4.1.3 FUNCIÓN 3. DESARROLLO VEGETAL ÓPTIMO

3.2.4.1.3.1 FUNCIÓN 3.1. AMBIENTE FÍSICO

Refiriéndonos a las condiciones físicas óptimas para el crecimiento vegetal, consideramos dos tipos de densidad del suelo como indicadores; la densidad aparente (Db) y el contenido de fracción fina por unidad de volumen total (Da); ambos del tipo menos es mejor, pues las densidades mayores implican un menor espacio poroso del suelo y por tanto menor movimiento de aire y agua y menor espacio para el desarrollo radicular (*Brady y Weil, 1999*). Se sustituyó densidad aparente por el contenido de agua gravitacional en saturación (W) con un $r=-0,871^{**}$, pues la densidad aparente refleja el espacio disponible para la acumulación de agua en el suelo y mayores contenidos de agua son favorables para el desarrollo de la vegetación. Mientras que el contenido de fracción fina por unidad de volumen total fue sustituido por la conductividad hidráulica con un $r=-0,671^{**}$, que refleja los mejores flujos de agua cuando el contenido de fracción fina disminuye en el suelo. Esto es evidente cuando los contenidos de grava son muy altos y el agua es infiltrada rápidamente. Ambos indicadores sustitutos son catalogados del tipo más es mejor (*Brady y Weil, 1999; Glover y col, 2000; Arshad y Martin, 2002; Amacher y col, 2007*).

3.2.4.1.3.2 FUNCIÓN 3.2. DISPONIBILIDAD DE LOS NUTRIENTES

La disponibilidad de los nutrientes para la vegetación, está regulada principalmente por el pH del suelo. Medios ácidos inhiben procesos como la nitrificación, encargada de la formación de nitratos; además reflejan la ausencia de Ca⁺⁺ y también tienden a inmovilizar los iones de P y el K. Sin embargo, altos pH también pueden inmovilizar algunos elementos (el P es inmóvil cuando se une con tres Ca⁺⁺, suelos con pH>8). Sin embargo, el rango de variación del pH para los páramos andinos no sobrepasa valores de 7, por lo que se considera indicador del tipo más es mejor. Otros indicadores considerados en esta función son los contenidos de N mineral, P y K disponibles, los macronutrientes requeridos por la vegetación, que constantemente son aplicados a los cultivos en fertilizantes minerales. El exceso de N en los suelos puede generar pérdidas por volatilización y lixiviación, además de causar en algunos casos la eutrofización de fuentes de agua adyacentes, por lo que se consideró el N mineral del tipo más es mejor con un máx en 15 mg Kg⁻¹; el contenido de P y K proporcionan una mayor calidad a la MOS y difícilmente se encuentran en cantidades mayores a lo tolerado por la vegetación por lo que se consideraron indicadores más es mejor (*Brady y Weil, 1999; Glover y col, 2000; Abadín y col, 2002; Chia - Hsing y col, 2006; Amacher y col, 2007*).

Como indicadores sustitutos se usó el contenido de Ca en lugar del pH con $r=0,665^{**}$, ya que los suelos con alto pH generalmente son calcáreos (con altos contenidos de Ca⁺⁺). En lugar del N mineral se propuso el contenido de NO₃⁻ que representa una de las formas de N mineral asimilables por las plantas, con $r=0,509^*$, y como sustituto de los contenidos de P y K, se usó la conductividad eléctrica con $r=0,633^{**}$ y $r=0,527^*$ respectivamente; pues ésta depende de las cargas que hay en el suelo.

Debido a que la CE sustituye dos indicadores básicos, su peso relativo corresponde a la suma de los pesos de P y K.

3.2.4.2 ESTANDARIZACIÓN DE LOS INDICADORES SELECCIONADOS

La estandarización de los indicadores, según las tendencias mencionadas en la Tabla 3.13; son mostradas en las Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12 donde se muestran las ecuaciones utilizadas en el cálculo de índice de calidad edáfica.

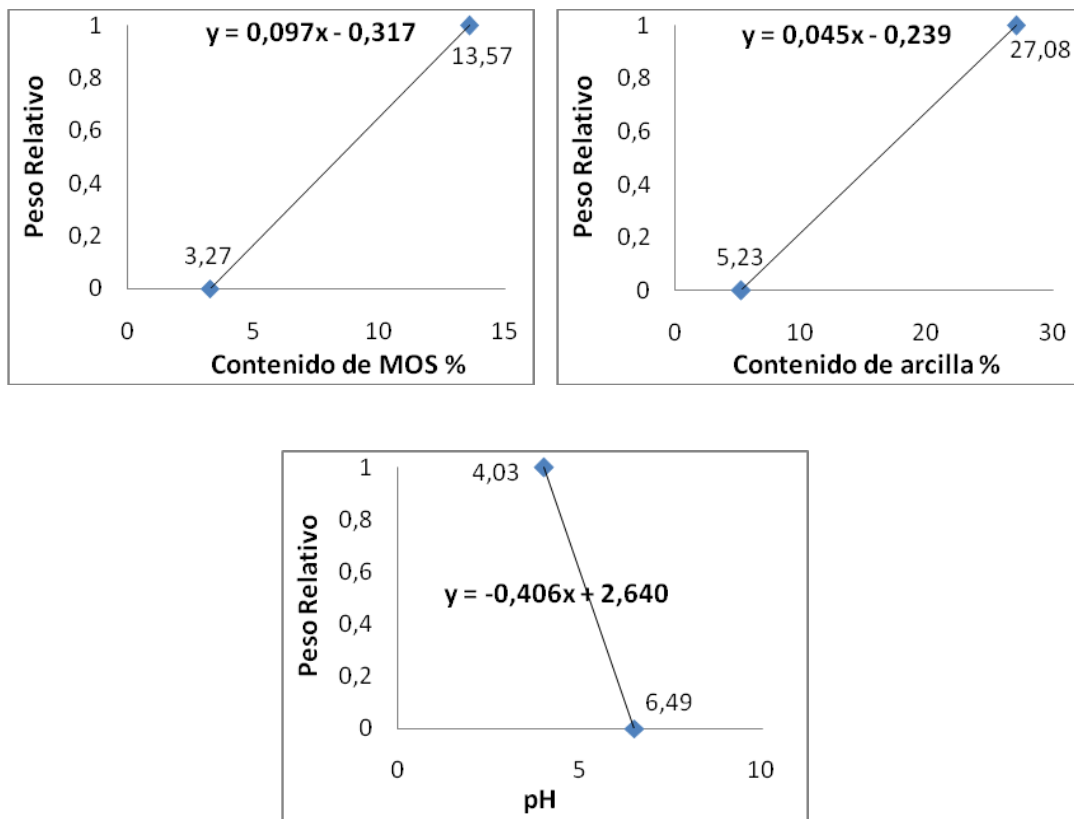


FIGURA 3.10. Indicadores básicos estandarizados de la función 1, con tendencias de “más es mejor” para los contenidos de MOS y arcilla y “menos es mejor” para el pH. Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados junto a la línea. La ecuación de la recta se ubica en la parte superior del gráfico.

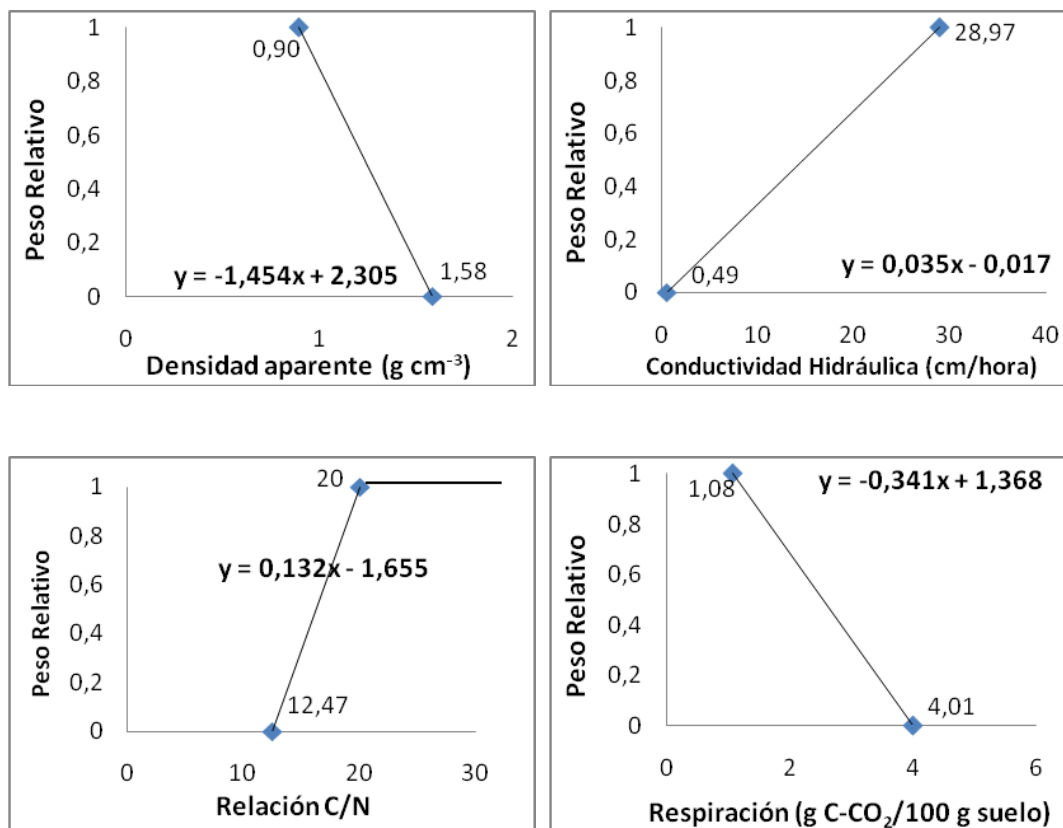


FIGURA 3.11. Indicadores básicos estandarizados de la función 2, con tendencias de “más es mejor” para la conductividad hidráulica (CH) y la relación C/N*, y “menos es mejor” para la densidad aparente (Db) y la respiración (Resp). Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados junto a los extremos de la línea. La ecuación de la recta se ubica en la parte superior del gráfico. * La estandarización de la relación C/N se hizo estableciendo un límite específico, puede observarse la estabilización de la recta para valores mayores de 20.

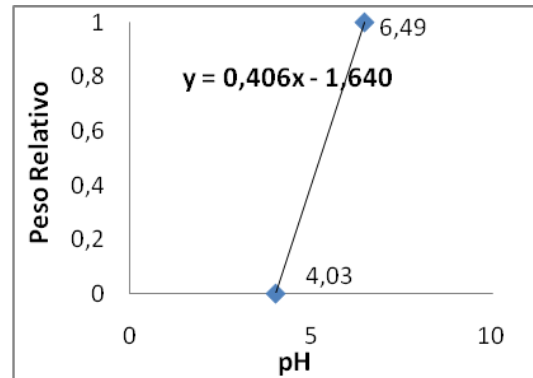
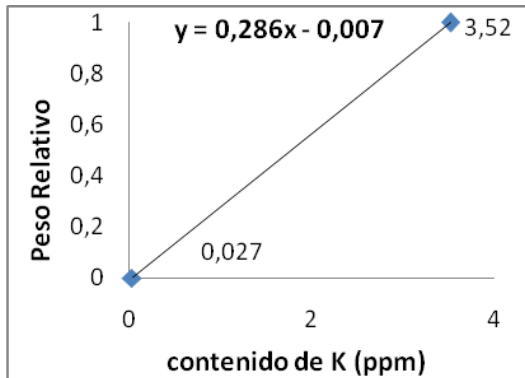
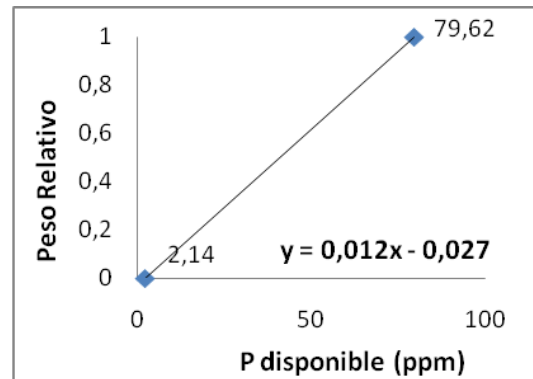
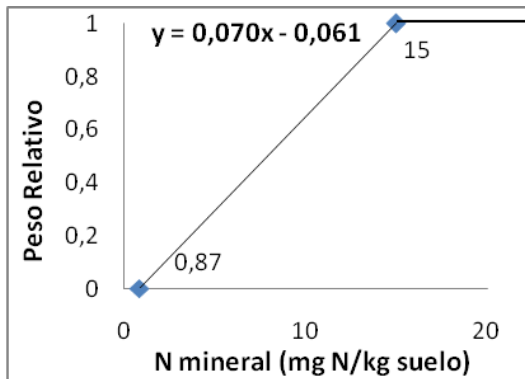
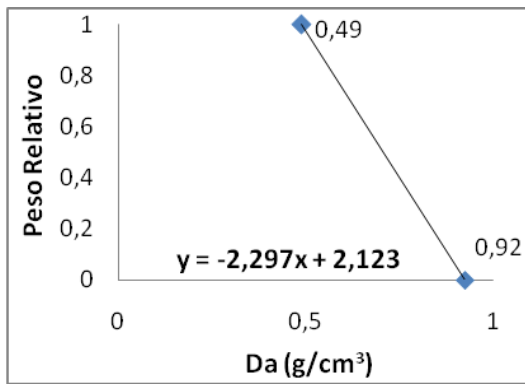


FIGURA 3.12. Indicadores de la función 3, estandarizados con tendencias de “más es mejor” para el N mineral*, contenidos de P y K disponibles y pH; y tendencias de “menos es mejor” para el contenido de fracción fina (< 2 mm) por unidad de volumen total (Da). Los valores máximo y mínimo de cada variable son señalados en los extremos de la línea.
 * La estandarización del N mineral se hizo estableciendo un límite específico, puede observarse la estabilización de la recta para valores mayores de 15.

3.2.4.3 PLANTEAMIENTO DE DOS MODELOS HIPOTÉTICOS DE ÍNDICE DE CALIDAD EDÁFICA

Los modelos del índice planteados son, el modelo 1 que consideró las dos primeras funciones del nivel 1 (retención de agua y nutrientes y resistencia a la degradación) con pesos relativos de 0,5 para cada una, evaluando así las condiciones físicas del suelo que reflejan su grado de degradación, sin considerar el manejo agrícola de la fertilidad (Tabla 3.14).

El modelo 2 en cambio, consideró las tres funciones del nivel 1, con pesos relativos de 0.3, 0.3 y 0.4 respectivamente; incluyendo la influencia de las prácticas agrícolas (función 3), como, el arado que modifica el ambiente físico del suelo (Función 3.1), y la fertilización mineral que modifica la cantidad y el estado de los nutrientes presentes en él (Función 3.2). Los pesos relativos de cada función fueron asignados según el modelo, como se muestra en la Tabla 3.14.

TABLA 3.14. Repartición de los pesos relativos asignados a cada una de las funciones del nivel 1 y nivel 2, para cada uno de los modelos planteados. Para un peso total de 1 en cada uno de los modelos.

Función del Suelo	Peso relativo	
	Modelo 1	Modelo 2
1. Capacidad de retención de agua y nutrientes	0,5	0,3
2. Resistencia a la degradación		
2.1. Infiltración	0,25	0,2
2.2. Almacenamiento de C	0,25	0,1
	0,5	0,3
3. Desarrollo Vegetal Óptimo		
3.1. Ambiente físico óptimo para el desarrollo vegetal	0	0,2
3.2. Disponibilidad de nutrientes para las plantas	0	0,2
	0	0,4
Total	1	1

Considerando los sets de indicadores (Tabla 3.13) planteados y los modelos de índice de calidad del suelo (Tabla 3.14), se obtuvieron cuatro combinaciones diferentes: *Modelo 1 – Indicadores Básicos (M1-B), *Modelo 1 – Indicadores Sustitutos (M1-S), *Modelo 2 – Indicadores Básicos (M2-B), *Modelo 2 – Indicadores Sustitutos (M2-S) del índice de calidad edáfica mostrados en la Tabla 3.15.

3.2.4.4 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO

La Tabla 3.15 muestra los resultados del índice considerando el modelo 1, con las mismas tendencias entre los indicadores básicos y sustitutos. Sin embargo, la prueba estadística mostró que los indicadores básicos separan mucho mejor los tratamientos entre sí que los sustitutos; estos últimos al parecer son sensibles principalmente a la degradación ya que separa PN y SA de LD y LR.

Más detalladamente, se encontraron páramos naturales con mayor capacidad de retención de agua y nutrientes y altos contenidos de C acumulado, con infiltraciones bajas. Los SA muestran los valores más altos de infiltración seguidos por LR; tanto SA como LR tienen bajas capacidades de retener agua y nutrientes en comparación con el PN. Las LD muestran valores bajos de capacidad de retención de agua y nutrientes similar a lo encontrado en LR, la infiltración es mayor en LR que en LD, sin embargo es considerada baja para ambos tratamientos; el almacenamiento de C parece ser mayor en LD que en LR. Finalmente el índice con el Modelo 1 refleja PN con el mejor puntaje, seguidos por el SA que parece tener un menor impacto sobre la calidad del suelo en contraste con lo observado en la Degradación, pues los valores de LD y LR fueron los menores, incluso por debajo de 0,5. No se logró diferenciar claramente entre LD y LR, para reconocer si hay un mejoramiento de la calidad en LR; entre los sets de indicadores encontramos que los sustitutos muestran valores ligeramente mayores y cambios menos drásticos en cada transformación, así tenemos LD > LR con indicadores básicos y LD < LR con los indicadores sustitutos.

TABLA 3.15. Índice integrado de la calidad del suelo utilizando el modelo 1. Se muestran los promedios de cada tratamiento \pm desviación estándar, para cada función y el resultado final (ICS). Las letras en los valores finales del índice indican los diferentes grupos que reconoció la prueba estadística, sea a>b>c>d.

Modelo 1		Funciones			ICS
Set indicadores	Tratamiento	1	2.1	2.2	
Básicos	PN	0,37 \pm 0,05	0,09 \pm 0,03	0,19 \pm 0,02	0,65 \pm 0,16a
	SA	0,24 \pm 0,07	0,14 \pm 0,07	0,14 \pm 0,04	0,53 \pm 0,11b
	LD	0,15 \pm 0,10	0,05 \pm 0,02	0,12 \pm 0,01	0,33 \pm 0,07c
	LR	0,13 \pm 0,03	0,09 \pm 0,00	0,06 \pm 0,02	0,27 \pm 0,06d
Sustitutos	PN	0,36 \pm 0,04	0,12 \pm 0,02	0,19 \pm 0,02	0,66 \pm 0,15a
	SA	0,28 \pm 0,07	0,16 \pm 0,02	0,14 \pm 0,04	0,59 \pm 0,12a
	LD	0,18 \pm 0,09	0,07 \pm 0,01	0,12 \pm 0,01	0,37 \pm 0,08b
	LR	0,20 \pm 0,02	0,12 \pm 0,01	0,06 \pm 0,02	0,39 \pm 0,09b

En la Tabla 3.16 se muestran los resultados del índice integrado de calidad con el enfoque del Modelo 2. Este nuevo enfoque incluye las condiciones del suelo óptimas para el desarrollo vegetal, considerando aspectos físicos y nutricionales, donde los valores más altos fueron de SA y LR, para ambos sets de indicadores; mientras que los PN y LD muestran valores menores y con pocas diferencias entre ellos. Sin embargo, la prueba estadística reflejó que LR no se separó muy bien del PN para ambos sets de indicadores, y tampoco se separó del SA en el caso con indicadores básicos.

Finalmente los valores del índice final usando el Modelo 2, ubicó el SA por encima del PN, debido al mejoramiento de las condiciones por el manejo agrícola; también se observó una mejoría de LR sobre LD, tanto con los indicadores básicos como con los sustitutos; a diferencia de los resultados obtenidos en el ICS –Modelo 1. Las LD mostraron los valores significativamente menores del índice respecto a los demás tratamientos. En general los indicadores básicos muestran índices más altos para PN, SA y LD; sin embargo los indicadores sustitutos parecen separar mejor estos tres tratamientos, con diferencias estadísticas significativas.

TABLA 3.16. Índice integrado de la calidad del suelo utilizando el modelo 2. Se muestra el promedio de cada tratamiento \pm desviación estándar, para cada función y el resultado final (ICS). Las letras en los valores finales del índice indican los diferentes grupos que reconoció la prueba estadística, sea a>b>c.

Modelo 2		Funciones					ICS
Set indicadores	Suelo	1	2.1	2.2	3.1	3.2	
Básicos	PN	0,22 \pm 0,03	0,07 \pm 0,02	0,08 \pm 0,01	0,09 \pm 0,02	0,03 \pm 0,01	0,49 \pm 0,07a
	SA	0,15 \pm 0,04	0,12 \pm 0,05	0,06 \pm 0,02	0,13 \pm 0,04	0,13 \pm 0,05	0,58 \pm 0,03a
	LD	0,09 \pm 0,06	0,04 \pm 0,01	0,05 \pm 0,01	0,06 \pm 0,01	0,04 \pm 0,01	0,28 \pm 0,02b
	LR	0,08 \pm 0,02	0,07 \pm 0,00	0,02 \pm 0,01	0,10 \pm 0,01	0,12 \pm 0,04	0,39 \pm 0,04ab
Sustitutos	PN	0,21 \pm 0,03	0,09 \pm 0,02	0,08 \pm 0,01	0,06 \pm 0,02	0,01 \pm 0,01	0,45 \pm 0,08b
	SA	0,17 \pm 0,04	0,13 \pm 0,02	0,06 \pm 0,02	0,11 \pm 0,05	0,08 \pm 0,01	0,55 \pm 0,33a
	LD	0,11 \pm 0,06	0,06 \pm 0,01	0,05 \pm 0,01	0,03 \pm 0,01	0,01 \pm 0,02	0,26 \pm 0,03c
	LR	0,12 \pm 0,01	0,10 \pm 0,01	0,02 \pm 0,01	0,06 \pm 0,01	0,11 \pm 0,04	0,42 \pm 0,36ab

3.2.4.5 RELACIONES ENTRE DOS SETS DE INDICADORES (BÁSICOS Y SUSTITUTOS)

Las correlaciones entre ambos sets de variables para cada función reflejaron su correspondencia y fiabilidad al momento de la sustitución de los indicadores; el valor de R^2 (Figura 3.13 y Figura 3.14) más alto entre las funciones fue para la capacidad de retención de agua y nutrientes ($R^2 = 0,9235$), en el caso de la infiltración ($R^2 = 0,5087$) hay una dispersión entre los valores más bajos, para ambas funciones, los indicadores sustitutos sobreestiman a los indicadores básicos. El almacenamiento de c no presenta un set de indicadores sustitutos, pues no se encontraron variables pertinentes entre las determinadas para este trabajo, que permitieran una buena interpretación de este proceso. Las condiciones del ambiente físico y disponibilidad de nutrientes (con $R^2 = 0,705$ y $R^2 = 0,773$ respectivamente) mostraron que los indicadores sustitutos subestiman a los básicos, sin embargo la correlación es alta.

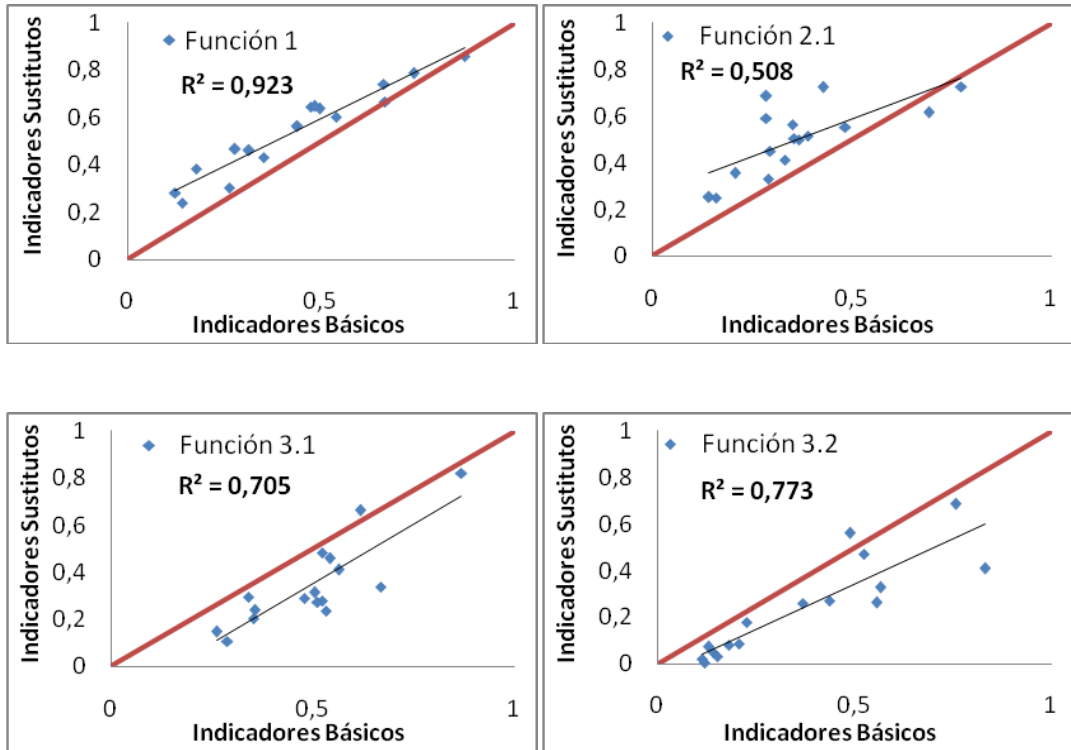


FIGURA 3.13. Correlación entre los valores obtenidos para cada función del suelo utilizando los indicadores básicos y sustitutos en relación a la recta 1:1 (en rojo)

En la Figura 3.14 se muestra un alto $R^2=0,915$ que refleja la buena correspondencia que hay entre ambos sets de indicadores, dándole un 92% de fiabilidad al set de indicadores sustitutos.

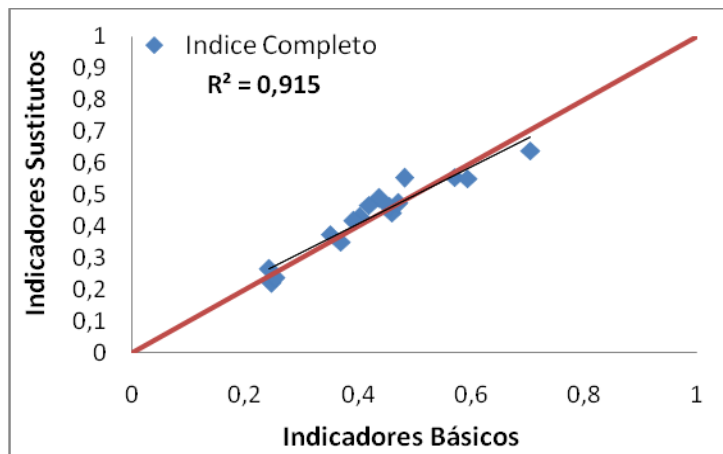


FIGURA 3.14. Correlación del índice de calidad edáfica calculado utilizando los indicadores básicos y sustitutos, en relación a la recta 1:1 (en rojo).

4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 LOS PÁRAMOS NATURALES COMO LÍNEA BASE DE LAS TRANSFORMACIONES

Los Páramos evaluados en este trabajo se encuentran ubicados dentro del Bolsón Seco de Mucuchíes, recibiendo precipitaciones que oscilan entre los 600 y 800 mm año⁻¹; por lo que se consideraron páramos secos, ya que se han reportado mayores precipitaciones en localidades de páramo dentro de la misma cordillera de Mérida, encontrando un amplio rango de variación, entre 600 y 1800 mm año⁻¹ (*Monasterio, 1980; Sarmiento, 1986*). Para páramos de Ecuador se reportan precipitaciones entre 1200 y 1600 mm año⁻¹ (*Buytaert y col, 2005*) y para páramos de Colombia entre 800 y 1900 mm (*Sarmiento, 1986*), lo que ubica la zona de estudio en el extremo seco del gradiente de precipitación reportado para este ecosistema a nivel continental.

Estos páramos mostraron en promedio un contenido de MOS de 10,14±1,84%; ubicándose en el límite inferior del rango que los cataloga como suelos orgánicos (*Guitian y Carballas, 1976*). Tales valores de MOS equivalen a 58,8 g C orgánico kg⁻¹ suelo. Otros autores describen páramos con mayores contenidos de C orgánico en Ecuador (con 100-400 g C orgánico kg⁻¹ suelo) (*Buytaert y col, 2005*) y Gavidia en la Sierra Nevada de Mérida entre 76 y 134 g C orgánico kg⁻¹ suelo (*Llambí y Sarmiento 1997 y 1998; Abadín y col, 2002; Gonzales, 2004; Felicien, 2009; Abreu y col, 2009*). En un suelo en Mocoa, dentro de nuestra área de estudio, *Malagón, (1982)* encuentra contenidos muy similares de C orgánico (53,7 g C orgánico kg⁻¹ suelo). Este menor contenido de C en el suelo tiene mucho que ver con una mayor susceptibilidad a la degradación y explica en parte el gran impacto del sistema triguero en la zona, ya que la materia orgánica del suelo es un aspecto clave en la resistencia de un suelo al disturbio. La relación C/N para los páramos estudiados fue en promedio de 20,18±1,23; similar a lo encontrado en Gavidia (entre 17,4 y 18,7) (*Abadín y col, 2002; Gonzales, 2004; Abreu y col, 2009*); en Bahitos (17,7) y Los Pozos (17,3) (*García, 2010*). Estas altas relaciones C/N reflejan la baja calidad de la MOS acumulada en estos suelos, que junto a las bajas temperaturas características de este ecosistema, entre 0 y 10 °C (*Monasterio, 1980; Sarmiento, 1986*), disminuyen las tasas de descomposición del material orgánico. Estos valores a su vez reflejan el papel de dichos suelos como acumuladores de C. El contenido de N total fue de 0,29±0,06%. Otros autores encontraron en Gavidia contenidos mayores (entre 0,41-0,60 %) (*Abadín y col, 2002; Abreu y col, 2009*), mientras que Los Bahitos (0,23 %) y Los Pozos (0,28 %) muestran condiciones más similares a las reportadas en este estudio (*García, 2010*). Esto puede estar muy relacionado a los contenidos de MOS presentes en los diferentes páramos, ya que ambas variables se correlacionan (Correlación de Pearson = 0,889**) debido a que la mayor parte del N se encuentra formando parte de la misma materia orgánica.

Según los contenidos promedios de las diferentes fracciones texturales (a: 50,03±11,33%, l: 30,71±5,14 %, A: 19,26±6,45 %) estos son suelos de textura franca (*Guitian y Carballas, 1976*); lo que coincide con lo encontrado en la bibliografía para el Granizo en Colombia (*Estupiñan y col, 2009*); Gavidia (*Abadín y col, 2002; Gonzales, 2004; Felicien, 2009*); y Los Pozos (*García, 2010*). Se encontraron textura franco-arenosas, más gruesas, en el caso de los Bahitos (*García, 2010*) y Mucuchíes (*Malagón, 1982*). Se observa un dominio de la fracción arenosa y menores porcentajes de arcilla, que puede ser consecuencia de la composición mineralógica de los suelos de la zona que se derivan mayormente de esquistos y gneiss de edad precámbrica y (los bajos contenidos de Ca en solución y la posición geomorfológica del lugar (altas pendientes) (*Malagón, 1982*).

Las capacidades de retención de agua fueron de $28,07 \pm 4,45$ % para la CC y $14,75 \pm 4,77$ % para el PMP; más bajas que lo reportado en otros páramos más húmedos como el Granizo en Colombia (126,3 %) (*Estupiñan y col, 2009*) y varios páramos de Ecuador (67,3 %) (*Buytaert y col. 2005*). En el páramo de Gavidia se encuentran capacidades de retención menores (46,9 %) (*Abadín y col, 2002*). Los páramos de este estudio pudieran resultar un poco más secos por ubicarse en el bolsón de Mucuchíes y recibir menores precipitaciones, además de mostrar texturas franco y franco -arenosas (más gruesas). Similares tendencias encontró en Mucuchíes *Malagón (1982)*, con CC 16,49 %.

Las densidades aparentes promedio de $1,23 \pm 0,10$ g cm⁻³ son consideradas altas, en comparación con lo encontrado para Ecuador con densidades de $0,3$ g cm⁻³ (*Buytaert y col. 2005*) o para el Páramo el Granizo en Colombia, con $0,62$ g cm⁻³ (*Estupiñan y col, 2009*). Estas densidades altas podrían ser debidas a la presencia de piedras y gravilla, ausente en los andosoles de Ecuador y Colombia. El pH de los suelos de páramo fue en promedio de $5,04 \pm 0,43$, por lo que pueden ser catalogados como ácidos (*Guitian y Carballas, 1976*) y resultaron similares a lo encontrado en Gavidia (5,17 -5,35) (*Abadín y col, 2002; Abreu y col, 2009*). Los Bahitos (4,8) y Los Pozos (5,0) (*García, 2010*) tendencia generalizada para los suelos de páramo. Estos pH inferiores a 5,5 son indicadores de texturas principalmente arenosas o con valores > 10% de MOS (*Guitian y Carballas, 1976*), lo que coincide muy bien con los resultados expresados. La capacidad de intercambio catiónico fue en promedio $5,28 \pm 0,9$ meq 100 g⁻¹ suelo, menor que la reportada para Gavidia ($23,9$ meq 100 g⁻¹ suelo) (*Abreu y col, 2009*); Los Bahitos ($12,7$ meq 100g⁻¹ suelo) y Los Pozos ($20,3$ meq 100 g⁻¹ suelo) (*García, 2010*). Las bajas CIC están relacionadas con los bajos contenidos de arcillas (*Brady y Weil, 1999*), de estos suelos principalmente arenosos (*Malagón, 1982*) y con los contenidos de MOS también bajos.

Los valores de conductividad eléctrica de $0,04$ dS m⁻¹ para este estudio resultaron bajos y algo menores a los obtenidos en Los Bahitos y Los Pozos ($0,1$ dS m⁻¹ para ambos) (*García, 2010*). En el rango obtenido no se considera que haya problemas de salinización, ya que los suelos que presentan tales condiciones por lo general muestran una dominancia de los iones Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ en el complejo de intercambio, situación típica de suelos con altos pH (mayores a 6,5) (*Brady y Weil, 1999*). Respecto a los microorganismos del suelo, expresados en el logaritmo del número más probable (NMP) de organismos g⁻¹ suelo, encontramos poblaciones de Bacterias Heterótrofas de $5,25 \pm 1,10$; menores a las reportadas para Los Bahitos, (6,33); y Los Pozos (7,20). De igual manera, los celulolíticos ($0,65 \pm 0,08$) resultaron mucho menores a los reportados en Bahitos (2,87) y Los Pozos (4,09). Contrario a esto, los proteolíticos ($5,11 \pm 1,11$) en este estudio mostraron poblaciones similares a las de los Bahitos (5,9) y Los Pozos (6,63). La relación Oligotrofos/Copiotrofos de $1,03 \pm 0,09$ resultó alta al comparar con Bahitos y Los Pozos, con 0,98 y 0,85 respectivamente (*García, 2010*), lo que refleja una dominancia de oligotrofos, dichos organismos son indicadores de ambientes estables.

Encontramos contenidos de P disponible de $12,28 \pm 7,13$ ppm, Ca ($2,59 \pm 1,68$ ppm) > Mg ($0,59 \pm 0,41$ ppm) > K ($0,41 \pm 0,2$ ppm) > Na ($0,02 \pm 0,01$ ppm). Otros estudios encontraron valores menores de P disponible en el Páramo de Gavidia (3,3 ppm) y en Los Pozos (1,9 ppm), reflejando bajos contenidos de nutrientes, mientras que los Bahitos mostraron valores más altos de P (25,9 ppm). Por otra parte, los % saturación de bases ($66,62 \pm 36,50$ %) resultaron altos en comparación con lo reportado para Gavidia (32,8 -38,2 %); en los Bahitos (40 %) y Los Pozos (52 %) (*Abadín y col, 2002, Gonzales, 2004; Abreu y col, 2009; García, 2010*). Los contenidos de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ disponibles parecen estar dominando el complejo de intercambio catiónico, lo que resulta comprensible, ya que estos cationes son predominantes en regiones de bajas precipitaciones, como es el caso de los páramos de este trabajo (*Brady y Weil, 1999*). Las mismas razones de bajas precipitaciones generan además los altos % de saturación de bases, por el menor lavado de iones positivos del suelo (*Malagón, 1982*). El N mineral ($2,28 \pm 1,23$ mg kg⁻¹ suelo) compuesto por NO₃⁻ ($0,39 \pm 0,48$ mg kg⁻¹ suelo) y NH₄⁺ ($1,88 \pm 1,06$ mg kg⁻¹ suelo), se considera bajo en comparación con lo encontrado en Los

Bahitos y Los Pozos (12,5 y 13,7 mg N min kg⁻¹ suelo, respectivamente), más específicamente con contenidos de amonio de 8,2 y 11,7 mg N- NH₄⁺ kg⁻¹ suelo y de nitrato de 4,2 y 1,95 mg N- NO₃⁻ kg⁻¹ suelo para Los Bahitos y Los Pozos, respectivamente (García, 2010). Reflejando una baja tasa de nitrificación en estos páramos, que puede estar asociada con los pH ácidos que inhiben dicho proceso.

De lo anteriormente expuesto puede concluirse que los páramos del bolsón seco del valle alto del Chama presentan características edáficas que están condicionadas por su evolución sobre un clima bastante seco, que por un lado limitó la acumulación de MOS y por otro lado los procesos de migración en el perfil, por lo que tenemos un complejo de intercambio catiónico relativamente saturado de bases. Malagón, (1982) clasifica este suelo como un entisol (suelo con muy poco desarrollo de horizontes) en contraste con otros perfiles de suelos de páramo que corresponden a inceptisoles. Por la baja acumulación de MOS, son suelos con mayor densidad aparente que los de otros páramos y por lo tanto menor capacidad de retener agua. Hay que tener en cuenta estas particularidades a la hora de analizar la resistencia que puede tener este suelo de páramo a la degradación.

4.2 EFECTO DE LA AGRICULTURA INTENSIVA ACTUAL

En este punto discutiremos las dos primeras hipótesis de investigación y nos basaremos en una comparación entre el suelo de páramo, que constituye la línea base, y los suelos agrícolas cuyo efecto se quiere evaluar. La primera hipótesis proponía que, comparativamente a los demás tratamientos, en los suelos de páramo natural (PN), se esperaba encontrar valores altos de MOS y por tanto, alta capacidad de retención de agua y altos contenidos de N total, elevadas capacidades de intercambio catiónico (CIC) por sus suelos más arcillosos y los valores de pH más ácidos. Respecto a la microbiota, se esperaba dominancia de microorganismos Oligotrofos por ser un ambiente estable. La materia orgánica del páramo se esperaba que fuera más estable, por lo que los porcentajes de carbono respirado en relación al carbono total serían menores. Así mismo se esperaba la menor proporción de nitratos ya que el pH ácido debe inhibir el proceso de nitrificación.

Por su parte, la Hipótesis 2, proponía que en comparación con el suelo de páramo, en el suelo con agricultura intensiva (SA) se esperaba encontrar valores de pH cercanos a la neutralidad debido al encalado, que busca disminuir la acidez de estos suelos, bajos niveles de compactación y densidad aparente por la aplicación de pargana y el arado, lo que podría estar aumentando la conductividad hidráulica. También se esperaba una MOS de naturaleza más lábil derivada de las enmiendas orgánicas de reciente aplicación, por lo que además se esperaba una mayor fertilidad. Respecto a la microbiología, se esperaba una dominancia de organismos copiotrofos, característicos de ambientes con alta disponibilidad de nutrientes y sustratos carbonados lábiles.

En la conversión de páramo natural a suelo agrícola puede observarse una clara separación a lo largo del eje 1 en el análisis multivariado completo (Figura 3.2 y Figura 3.3), donde las variables que disminuyeron en los suelos agrícolas fueron, CC, Q, MOS, arcilla y limo, mientras que las que aumentaron con la transformación fueron arena, pH, CE, P disponible, Ca, Mg, saturación de bases, relación NO₃⁻/Nm, todos los grupos de microorganismos excepto la relación oligotrofos /copiotrofos, BMa, BMt, la respiración y el C respirado en relación al C total. En la Figura 4.1 se realiza una síntesis de los cambios ocurridos en esta transformación, los cuales no siempre resultaron significativos al aplicar las permanovas, pero si se pueden visualizar en el análisis multivariado. All

analizar el efecto de la transformación a agricultura intensiva, resalta leves pérdidas de MOS (disminución del 23,8 %) (Figura 4.1). Este efecto de la agricultura se ha reportado para numerosos ecosistemas, como bosques secos en el Edo. Falcón (Rodríguez y col, 2009), el bosque siempreverde seco de Cacute y la selva nublada de La Mucuy en Mérida (García, 2010); y también en otros páramos, en Ecuador (Buytaert y col, 2005), en Gavidia (Gonzales, 2004) y en Bahitos (García, 2010). Estos cambios probablemente han sido ocasionados por la utilización de prácticas como el arado, que destruye los agregados del suelo y estimula la oxidación de la MOS, dañando también la estructura edáfica, además de la exportación de un porcentaje alto de la producción primaria a través de la cosecha, la cual deja de incorporarse a la MOS.

La materia orgánica de los suelos agrícolas presentó una disminución significativa de la relación C/N (de $20,18 \pm 1,23$ a $16,03 \pm 1,98$) (Tabla 3.2 y Figura 4.1). En transformaciones de otros ecosistemas se encuentra la misma disminución en la relación C/N, como en el bosque seco de las planicies de Coro convertido en cultivo de Melón (Rodríguez y col, 2009), en el bosque seco de Cacute y en la selva nublada de la Mucuy también convertida en cultivo de Maíz (García, 2010). Tendencias similares se reportaron también en suelos cultivados en Gavidia, donde la relación C/N disminuyó 2 unidades (de 18 a 16), a pesar de la ausencia de aplicaciones de enmiendas orgánicas en estos sistemas de manejo con barbecho (Gonzales, 2004) y en los Bahitos, donde disminuyó 3 unidades (de 17,7 a 14,13) (García, 2010). Esto podría ser por la baja relación C/N de los abonos orgánicos aplicados y por la adición de fertilizantes minerales nitrogenados, que tienden a causar acumulación de N orgánico y a conformar una materia orgánica que probablemente se descomponga más rápidamente (Rodríguez y col, 2009).

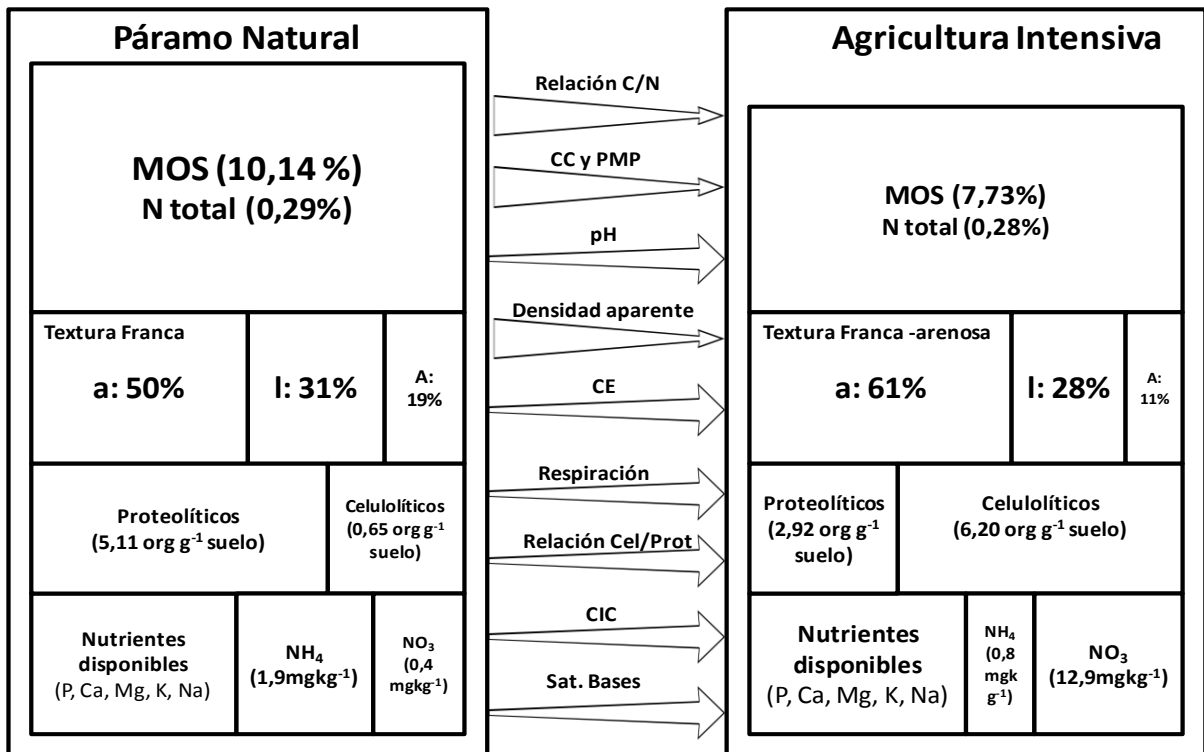


FIGURA 4.1. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación del páramo natural en agricultura intensiva. En las cajas se han representado los compartimentos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.

El N total se mantuvo prácticamente constante con valores de $0,29 \pm 0,06$ para el paramo y $0,28 \pm 0,1$ % para los suelos agrícolas (Tabla 3.2 y Figura 4.1). Estos contenidos están relativamente cercanos a lo reportado para los suelos cultivados de Mixteque con 0,24 % de N total (Machado, 2005). Las tendencias generales para otros páramos de la misma cordillera de Mérida fue la disminución de los contenidos de N total con la transformación a agricultura intensiva, incluyendo Bahitos (de 0,23 a 0,16 %) (García, 2010) y Gavidia (de 0,68 a 0,46 %) (Gonzales, 2004). Aunque otras localidades mostraron tendencias contrarias con la transformación, como Los Pozos (de 0,28 a 0,37 %) (García, 2010) y El Granizo en Colombia (de 0,86 a 1,05 %) (Estupiñan y col, 2009), probablemente por el manejo. Sin embargo en este estudio no se observaron tendencias claras respecto a esta variable que además mostró ser sensible al efecto del bloque (Tabla 3.4).

Por otra parte, a nivel textural se observaron pérdidas en el contenido de arcilla del 50 % ($19,26 \pm 6,45$ % en PN a $10,91 \pm 4,19$ % en SA) (Tabla 3.1) y aunque no fueron cambios significativos según las Permanovas debido a que en el sitio de Mocao el páramo natural tuvo un contenido de arcilla muy bajo, esta variación generó un cambio de texturas “francas” en páramo natural a “franco-arenosa” en suelos agrícolas (Guitian y Carballas, 1976). En otras localidades de páramo no se observan tendencias consistentes con la transformación, reportando texturas francas para suelo agrícola de Mixteque (Machado, 2005), para páramo natural y suelo agrícola en los Pozos (García, 2010); y texturas franco -arenosas para Bahitos, incluyendo ecosistema natural y conversión (García, 2010). Esto refleja que la textura es una variable bastante estable, que no oscila rápidamente con el manejo agrícola y depende principalmente de la naturaleza del suelo de esa localidad; que se caracteriza por tener un dominio de la fracción arenosa (80 -90 %) y contenidos menores de la fracción arcillosa (<30 %) (Malagón, 1992). Aun así, debe considerarse que las fracciones de arcilla pueden disminuir aun más con la utilización de prácticas agrícolas no sustentables en estas escarpadas laderas, como son el arado y el riego (Stelzer, 1992).

Los cambios en la densidad aparente no resultaron significativos, observando una disminución del 0,01 % con la transformación (Tabla 3.1 y Figura 4.1). Contrario a esto en suelos del Páramo El Granizo en Colombia, se observó el aumento de la densidad, donde se asume que las prácticas agrícolas utilizadas en ese páramo compactan el suelo, afectando posteriormente la infiltración del agua necesaria para la disponibilidad de muchos nutrientes (Estupiñan y col, 2009). En la transformación del bosque seco en las planicies de Coro, también se observó un aumento en la densidad (Rodríguez y col, 2009). Aunque la variación de la densidad con la transformación fue muy leve en este estudio, probablemente se podría encontrar su aumento a largo plazo debido a las prácticas aplicadas como el arado, que bajo estas fuertes pendientes podrían generar pérdidas de la estructura del suelo y por tanto su compactación.

Respecto a los movimientos de agua, se encontraron aumentos de la conductividad hidráulica con la transformación, llegando a reportar flujos de $12,90 \pm 11,24$ cm hora⁻¹ en SA. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas según el permanova debido a la alta variabilidad de esta medición. Otros autores encontraron las mismas tendencias en la transformación de bosque natural en Falcón ($1,23$ a $1,43$ cm hora⁻¹) (Rodríguez y col, 2009) y en páramos de Ecuador aunque el rango de variabilidad fue mucho menor ($1,21$ a $1,75$ cm hora⁻¹).

Partiendo de la disminución en los contenidos de MOS, el cambio de su naturaleza que la hace más lábil y las pérdidas de arcilla, generadas por algunas prácticas agrícolas como el arado y el riego, además del deterioro que ocasionan sobre la estructura del suelo, disminuyendo la densidad aparente y aumentando la conductividad hidráulica; encontramos también una disminución en la capacidad de retención de agua, considerando CC y PMP que disminuyeron en un 23 y 20 %

respectivamente. Encontraron tendencias similares para la transformación a agricultura en varias localidades, incluyendo el páramo El Granizo en Colombia (con CC de 126,3 a 109,6 % de agua en saturación) (*Estupiñan y col, 2009*), algunos páramos en Ecuador (PMP de 42 a 34 %) (*Buytaert y col, 2005*), los páramos de Gavidia (con CC de 62 a 48 %) (*Gonzales, 2004*) y en Bahitos (con CC de 31,2 a 24,9 %) (*García, 2010*), lo que refleja que las actividades agrícolas afectan la capacidad de retención de agua del suelo.

Otra de las prácticas agrícolas empleadas con el manejo intensivo es el encalado, que genera cambios directos en el pH; observando un aumento, que aunque no fue significativo según la permanova, se observó claramente en el análisis multivariado (Tabla 3.2, Figura 3.2 y Figura 3.3). Similar a esto, se encontraron aumentos en Bahitos (de 4,8 a 5) y en Los Pozos (de 5 a 6,2) (*García, 2010*). Estas condiciones podrían estar influyendo sobre algunas poblaciones de bacterias nitrificadoras, lo que podría explicar además los aumentos en los contenidos de NO_3^- en estos suelos (*Toro, 2008*). Sin embargo algunos autores reportaron disminuciones del pH con la transformación, en el páramo de Gavidia (de 5,5 a 4,9), debido a que en estos suelos no se practica el encalado (*Abadín y col, 2002; Gonzales, 2004 y Abreu y col, 2009*).

La capacidad de intercambio catiónico, también aumentó con la transformación según el análisis multivariado, aunque las diferencias no son significativas cuando se aplica un permanova (Tabla 3.2 y Figura 3.2). Encontraron las mismas tendencias en la transformación del bosque natural en la Planicie de Coro (*Rodríguez y col, 2009*) y en Los Pozos, en Mérida (*García, 2010*). Las mayores CIC pudieran atribuirse a la MOS de reciente aplicación, pues las arcillas se han perdido de estos suelos.

Respecto a la conductividad eléctrica, se observó un aumento bastante considerable (de $0,04 \pm 0,01$ a $0,19 \pm 0,02$ dS m^{-1}) (Tabla 3.2), indicando un mayor contenido de sales en el medio, que puede ser debido a las aplicaciones de fertilizantes, cal. Similar a lo encontrado en la transformación del bosque en las planicies de Coro (*Rodríguez y col, 2009*), en los Bahitos y en Los Pozos (*García, 2010*). El aumento en la conductividad eléctrica también puede ser consecuencia de la irrigación del cultivo en ambientes con alta evaporación, que tiende a salinizar levemente los suelos (*Brady y Weil, 1999*). En paramos de Gavidia, se encontró la tendencia contraria, con una disminución en la CE aunque muy pequeña (de 0,28 a 0,26 dS m^{-1}), probablemente esto se deba a que no aplican riego en estos cultivos (*Gonzales, 2004*).

Evaluando los cambios en los microorganismos se observaron aumentos estadísticamente significativos en el tamaño de las poblaciones en general. Con poblaciones de bacterias heterótrofas totales significativamente mayores en los suelos agrícolas. Similar a estas tendencias, encontramos poblaciones de bacterias mayores en suelos cultivados de los Bahitos y Los Pozos (con 7,20 y 8,13 unidades respectivamente) (*García, 2010*). Este aumento de microorganismos podría estar asociado al uso de enmiendas orgánicas que representan un sustrato para los mismos, además de aumentar las poblaciones por aplicación directa de las que se encuentran presentes en el material orgánico (*Rodríguez y col, 2009*). El caso contrario se encontró al evaluar el efecto de la transformación sobre otros ecosistemas, con una disminución de la población de bacterias en el bosque de Cacute y selva de la Mucuy, ambos convertidos en cultivo de maíz (7,85 y 7,35 respectivamente), lo que podría explicarse porque en estas siembras de maíz no se aplican enmiendas orgánicas (*García, 2010*).

La *relación* oligotrofos/ copiotrofos disminuyó levemente con la transformación (de $1,03 \pm 0,09$ a $0,94 \pm 0,19$). Similar a esto, en las transformaciones del bosque de Cacute y la Selva de la Mucuy a cultivo de maíz, se encontraron disminuciones muy pequeñas, así como también para los Bahitos

(García, 2010). Esto refleja un aumento en la población de copiotrofos, lo que puede ser reflejo de ambientes menos estables, con una mayor disponibilidad de nutrientes, lo que podría estar siendo generado por la aplicación de enmiendas orgánicas que aceleran la liberación de nutrientes en el suelo (García, 2010). Más específicamente, en los estudios microbiológicos se encontró un aumento significativo de los celulolíticos con la transformación a agricultura intensiva (Tabla 3.3). Similar a esto en Los Bahitos y Los Pozos, se encontraron aumentos en las poblaciones de celulolíticos con la transformación a agricultura (García, 2010). Contrariamente en el páramo de Gavidia se observa una disminución de las poblaciones de celulolíticos por la transformación a agricultura, lo que probablemente se debe a que en estos sistemas agrícolas con barbechos, no se acostumbra a aplicar enmiendas orgánicas como gallinazo o pargana (Gonzales, 2004). Por otra parte, los proteolíticos disminuyeron el tamaño relativo de sus poblaciones (Tabla 3.3). Similares tendencias reflejan Los Pozos (García, 2010) y Gavidia (Gonzales, 2004).

En la actividad microbiológica de estos suelos expresada como la respiración edáfica, se evidenció un leve aumento. Similar a lo encontrado en la transformación de un bosque seco en cultivo de zábila, en Coro (Rodríguez y col, 2009). Esto podría estar siendo ocasionado por las inclusiones de enmiendas orgánicas en estos suelos. El incremento de la respiración en los suelos cultivados también se observó en la zona semiárida bonaerense en Argentina, sobre cultivos de soya y trigo. Explicando que estos altos valores reflejan una mayor porosidad presente, causada por el arado (Gómez y col, 1996).

Los contenidos de nutrientes disponibles aumentaron en el SA. Esto es producto del acondicionamiento de los suelos para la agricultura, con aplicaciones directas de fertilizantes minerales, orgánicos y con el encalado para regular el pH proveyendo condiciones óptimas para mantener algunos elementos solubles. Así encontramos el aumento de P disponible, Mg, K, Na y % de saturación de bases en los suelos con agricultura intensiva. En el Páramo El Granizo en Colombia se encontraron las mismas tendencias para los contenidos de P disponible (con contenidos máximos de 200 ppm en suelos cultivados). Los valores bajos de P en el páramo reflejan la naturaleza de este elemento que tiende a mantenerse constante y en bajas proporciones durante el tiempo (Estupiñán y col, 2009). La transformación del bosque en las planicies de Coro, Falcón, también reflejaron aumentos de P, estos se deben a que los suelos agrícolas son fertilizados y reciben contenidos del elemento disponible, de forma directa (Rodríguez y col, 2009). Los contenidos reportados para suelos cultivados en Mixteque también son altos (560 ppm) (Machado, 2005) y finalmente, Los Pozos también mostró altos valores de este elemento en los suelos cultivados (21,8 ppm) (García, 2010). Similar a lo obtenido para este trabajo, se observó un aumento en los contenidos de bases, entre los páramos naturales en Gavidia y los suelos con agricultura intensiva en Mixteque significativamente mayores en los suelos cultivados (Machado, 2005; Felicien, 2009); y en Los Pozos con los contenidos de Ca, Mg, K, Na y % de saturación de bases (García, 2010). La transformación de Bosque en Coro, también mostró aumentos en los contenidos de K (Rodríguez y col, 2009).

Respecto al N mineral, encontramos tendencias a aumentar significativamente los contenidos totales con la transformación. Este aumento fue generado por los incrementos también significativos de NO_3^- en el suelo cultivado. Por el contrario, el contenido de NH_4^+ disminuyó con la transformación. Estos resultados reflejan que el N mineral se encuentra modulado principalmente por la forma nitrato, con una correlación de Pearson significativa entre ambas de 0,51*. Esto resulta interesante, ya que los fertilizantes son agregados en forma amoniacal y está predominando la forma nítrica en el suelo, reflejando un alto potencial de nitrificación, reportado por otros autores en suelos cultivados en el Valle alto del Chama, el cual se ve favorecido por el aumento del pH en los suelos agrícolas (Toro, 2008).

En conclusión podemos decir que esta transformación produce dos tipos de cambios, uno que afecta negativamente a algunas propiedades físicas, como la MOS y el contenido de arcilla, de recuperación lenta o irreversible y el otro que afecta a propiedades que responden de forma casi instantánea al manejo, como las poblaciones microbianas. Si bien los cambios no son drásticos, la sustentabilidad de este sistema pareciera estar asociada con un manejo muy cuidadoso de los abonos orgánicos, que permita mantener la funcionalidad del suelo. Por tanto el rol de las arcillas en la retención de agua y nutrientes debe ser suplido por la misma materia orgánica. Por otro lado nuestros resultados sugieren que la erosión ha sido importante en los sistemas agrícolas (pérdida grande de arcillas) y que habría que implementar prácticas de control.

4.3 EFECTO DE LA DEGRADACIÓN POR EL CICLO TRIGUERO

En esta parte someteremos a evaluación a la hipótesis 3, la cual postula que en las laderas degradadas (LD) se esperaba encontrar los menores valores de MOS y nutrientes disponibles como consecuencia de la historia de explotación para la producción de trigo en la cual no se aplicaban enmiendas orgánicas ni minerales y los descansos del suelo eran muy cortos. Se esperaba los menores valores de conductividad hidráulica, CC y PMP debido a las pérdidas de MOS. Además se deberían presentar los valores más altos de densidad aparente y texturas más arenosas como consecuencia de la pérdida de la fracción fina del suelo.

Se encontró que el proceso de degradación en los páramos, debido al ciclo triguero se asoció con el Eje 2 del ACP lo que indica que los cambios producidos por dicha transformación afectaron a un menor número de variables y en menor magnitud que los cambios producidos por la puesta en cultivo que se reflejan en el primer eje (Figura 3.2 y Figura 3.3). Sin embargo, esto no quiere decir que dichos cambios carecen de gran importancia ecológica. Las variables afectadas negativamente por el proceso de degradación fueron, CC, PMP, W, Q, MOS y CIC todas ellas variables de primer orden para el funcionamiento del suelo y que reducen su capacidad de regular los ciclos hidrológicos y de nutrientes. Por otra parte, la Db y relación C/N aumentaron con la degradación lo cual puede actuar negativamente sobre la capacidad de infiltración (Db) e indicar la naturaleza recalcitrante de la MOS presente (mayor C/N) (Figura 4.2). Resalta que las variables sensibles ante esta transformación fueron principalmente las físicas y unas pocas químicas, en contraste con la transformación agrícola que afectó principalmente las propiedades biológicas y químicas. Algunas de estas variables se encuentran juntas en el Grupo 1 del Dendrograma (Figura 3.7) mostrando su comportamiento similar ante las diferentes historias de uso.

Los resultados obtenidos se compararán con los de *Felicien (2009)* quien presenta información sobre un páramo natural en Gavidia y una ladera degradada en Angostura, pero bajo condiciones de precipitación muy diferentes. Por otro lado utilizaremos el estudio de degradación realizado por *Sarmiento y Smith (2011)* donde se evalúan 92 parcelas (11 corresponden a páramo natural y las demás se reparten entre diferentes grados de degradación), ambos trabajos desarrollados en el Valle alto del Chama. Otros autores son citados (*Coello y col, sin año; Zuo y col, 2008*) por sus estudios sobre la degradación edáfica, en ambientes diferentes al área de estudio.

Uno de los principales cambios que se observó con la degradación es la drástica disminución en el contenido de MOS, con pérdidas mayores a las encontradas con la transformación a agricultura intensiva, que representan aproximadamente el 40% del contenido original de MOS (Figura 4.2). Otros autores reportan las mismas tendencias en suelos degradados de China (*Zuo y col, 2009*), en

páramos degradados de Ecuador (Coello y col, sin año) y en laderas degradadas de la cordillera Mérida (Felicien, 2009; Sarmiento y Smith, 2011 y Sarmiento y Smith, en prensa). Estos cambios pueden estar relacionados con los procesos erosivos y con la estimulación de la tasa de descomposición por efecto del arado o por la menor incorporación de necromasa al suelo durante el cultivo de trigo debido a la cosecha, lo que ha producido una disminución en la fertilidad del suelo, pues la MOS es fuente fundamental de N y resulta vital para la retención de agua y nutrientes (Sarmiento y Smith, 2011 y Sarmiento y Smith, en prensa). Otros relacionan estas pérdidas con las pérdidas de la fracción fina del suelo (Zuo y col, 2009) ya que las arcillas representan una protección física para la MOS.

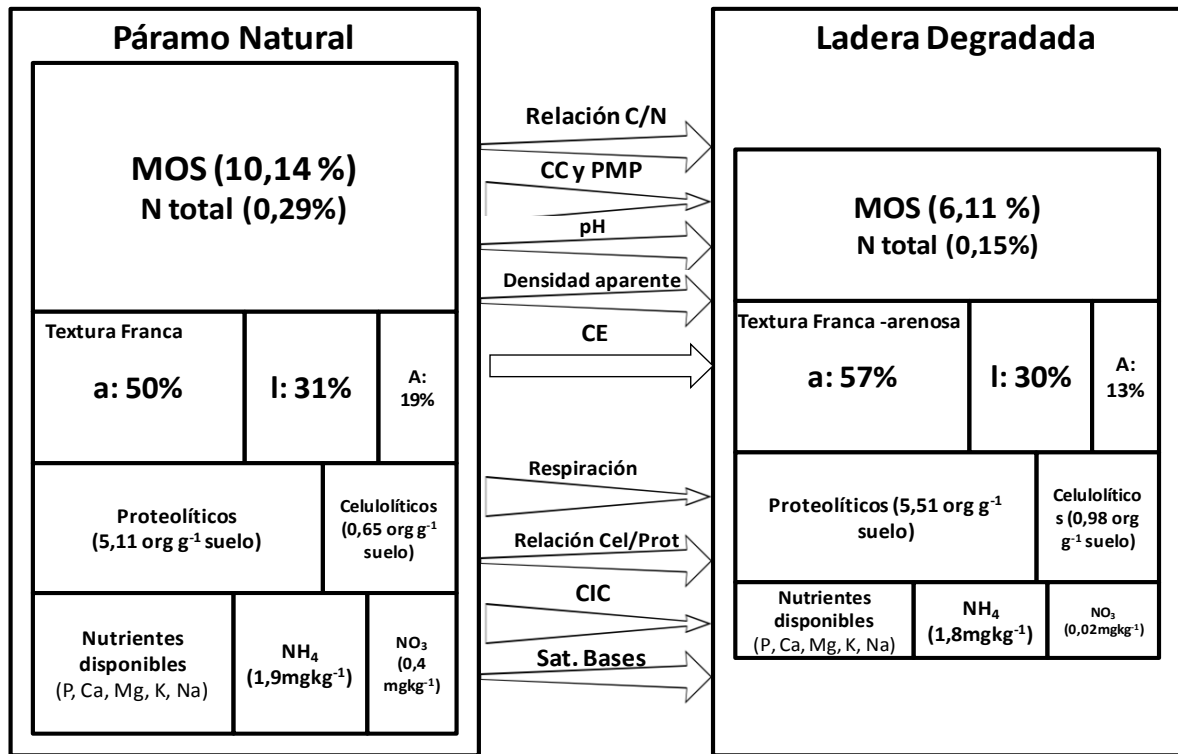


FIGURA 4.2. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación del páramo natural en ladera degradada. En las cajas se han representado los compartimientos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.

Paralelo a esto, se evidenció la misma tendencia con los contenidos de N total que disminuyeron porcentualmente más que la MOS (casi 50%), tendencia reportada también por otros autores en la cordillera de Mérida (Felicien, 2009; Sarmiento y Smith, 2011 y Sarmiento y Smith, en prensa). Las pérdidas de N como parte de la disminución de la MOS, implica una pérdida importante de la fertilidad de estos suelos, siendo éste uno de los principales nutrientes para las plantas. La MOS resultante aumentó su relación C/N pasando de $20,18 \pm 1,23$ a $24,36 \pm 5,64$ (Tabla 3.2, Figura 4.2); contrario a lo encontrado por Felicien, (2009), y (Sarmiento y Smith, 2011). Reflejando la baja calidad de la MOS que quedó en estos suelos después de la degradación, lo que además estará permitiendo su mantenimiento en el suelo por sus bajas tasas de descomposición.

Respecto a la textura, los contenidos de arcilla, disminuyeron respecto a los páramos naturales hasta valores similares a los del SA, catalogado entonces con textura Franco –arenosa (Guitian y Carballas, 1976) (Tabla 3.1; Figura 4.2); estas tendencias a perder la fracción más fina del suelo también las reportan Zuo y col, (2009); Sarmiento y Smith, (2011) y Sarmiento y Smith, en prensa. Lo que puede ser indicativo de los intensos procesos erosivos que ocurrieron en estos suelos (Zuo y col, 2009; Sarmiento y Smith, en prensa). Es por esto que se considera la textura una propiedad indicadora de degradación, particularmente en estos suelos principalmente arenosos, ubicados en las escarpadas y frágiles laderas de las montañas andinas.

Las pérdidas de MOS y arcilla tienen un efecto directo sobre la densidad aparente, llegando a obtener valores un 0,08 % mayores que en el PN. Otros autores reportaron densidades más altas para suelos degradados de China (Zuo y col, 2009) y en páramos degradados de Ecuador (Coello y col, sin año), lo que explican por las pérdidas de la fracción fina del suelo. Caso contrario a lo observado en los páramos de Mérida con suelos principalmente arenosos; por tanto, las altas densidades se atribuyen a las pérdidas de la estructura del suelo que se generaron por prácticas como el arado, causando la compactación de los mismos a largo plazo (Sarmiento y Smith, en prensa). Además se observó la clara disminución de la conductividad hidráulica respecto a los suelos cultivados. Sin embargo, los páramos naturales de este trabajo mostraron también bajos valores de conductividad hidráulica. Ambas condiciones (alta densidad aparente y baja conductividad hidráulica) modulan también los contenidos de agua en saturación (W y Q) en estos suelos; que disminuyeron un 0,16 y 0,05 % respectivamente (Tabla 3.1, Figura 4.2). Lo mismo se encontró para la capacidad de retención de agua. Tendencias similares reportó Felicien (2009).

El pH de los suelos aumentó respecto al páramo natural (Tabla 3.2), similar a lo encontrado por Felicien, (2009) aunque en este caso se comparan suelos de localidades diferentes, donde la variabilidad ambiental podría estar agregando error a estos resultados. Sin embargo, las mismas tendencias encontraron Sarmiento y Smith, (2011) evaluando suelos ubicados en el mismo Bolsón seco de Mucuchíes. Esta tendencia es probablemente consecuencia de la poca actividad de microorganismos descomponedores y los pocos contenidos de MOS presente, además de las acumulaciones de Ca⁺⁺ típica de los suelos degradados, pues el material rocoso está expuesto a una mayor tasa de meteorización.

Probablemente como consecuencia de los menores contenidos de MOS y arcilla, encontramos una disminución de la capacidad de intercambio catiónico de 32% (Figura 4.2). Tendencia similar a la reportada por otros autores (Felicien, 2009; Sarmiento y Smith, 2011 y en prensa). Mientras que, no se observaron cambios en la conductividad eléctrica, reflejando la ausencia de problemas de salinización en estos suelos por la degradación; probablemente debido a la ausencia de prácticas como el riego en estas laderas.

Entre los parámetros microbiológicos evaluados, no se encontraron grandes diferencias con la degradación, con poblaciones de bacterias que aumentaron levemente respecto al páramo natural para las bacterias heterótrofas totales los celulolíticos y los proteolíticos (Figura 4.2). En cuanto a la actividad de estos microorganismos, encontramos que la respiración del suelo disminuyó significativamente (Tabla 3.3 y Figura 4.2); reflejando una menor actividad biológica en los suelos degradados. Esto puede confirmarse en los análisis multivariados (Figura 3.2 y Figura 3.3) donde las variables microbiológicas se encuentran principalmente asociadas con los suelos que reciben un manejo agrícola y muestran los valores más bajos en los páramos naturales y suelos degradados. Similares tendencias reportó Felicien, (2009) para la respiración edáfica.

Una razón por la que no se encontraron diferencias significativas entre las poblaciones de bacterias entre los PN y las LD podría ser que en la determinación de los grupos microbiológicos se incubaron los microorganismos en medios y condiciones óptimas para su crecimiento; sin embargo al analizar las tendencias de la respiración, es evidente que la población de bacterias que está activa en los suelos degradados es mucho menor, es decir que muchos de los microorganismos presentes probablemente se encuentran en un estado latente, lo que podría ser una consecuencia de las limitaciones de sustratos carbonados que inhiben el desarrollo de estas poblaciones, por ser ésta su principal fuente de energía (*Brady y Weil, 1999*).

Respecto al contenido de nutrientes presentes en estado disponible para la vegetación se encontró, la disminución del P disponible y del contenido de K mientras que el resto de las bases y % de saturación de bases mostraron la tendencia contraria, incrementándose con la degradación (Figura 4.2). Similar a lo encontrado en este estudio, se han reportado aumentos de Ca, Mg y % de saturación de Bases por (*Felicien, 2009; Sarmiento y Smith, en prensa*). Estas tendencias, encontradas en ciertas bases como Ca, Mg, Na, probablemente son debido al rejuvenecimiento del suelo cuando es removido por la erosión y nuevo material mineral es liberado de la fracción rocosa, pues se liberan nutrientes con la exposición de la roca ante los factores climáticos (precipitación, viento, radiación). Los mayores contenidos de Ca acumulados con la degradación hacen que el total de bases aumente. Como consecuencia de bajas CIC y altos contenidos de Bases, el % Sat de Bases también aumenta; estos aumentos podrían estar asociados con el aumento del pH en estos suelos, considerando entonces estas tendencias como síntomas de desertificación de los suelos (*Sarmiento y Smith, en prensa*). Otras bases como el K mostraron leves disminuciones (*Sarmiento y Smith, en prensa*). Esta disminución en el contenido de K intercambiable pudiera incidir negativamente sobre la fertilidad de estos suelos (*Sarmiento y Smith, 2011*).

Los contenidos de N mineral disminuyeron con la degradación; más específicamente los contenidos de NH_4^+ y NO_3^- también disminuyeron con la degradación (Tabla 3.2 y Figura 4.2); esta última forma de nitrógeno mostró una disminución respecto al N mineral total (NO_3^-/Nm) un poco más marcada (de $14,1\% \pm 14,31$ a $0,92\% \pm 1,84$). Similares tendencias fueron encontradas por *Felicien, (2009)*, lo que podría estar indicando pérdidas de N, o un importante proceso de inmovilización es estas formas con la degradación.

Considerando las condiciones climáticas más áridas de los Páramos del Bolsón Seco de Mucuchíes en comparación con otros páramos andinos, nos encontramos ante suelos menos desarrollados y por tanto, más frágiles ante la degradación (*Sarmiento y Smith, en prensa*). Algunas prácticas del ciclo triguero, como el arado bajo condiciones de altas pendientes, causaron pérdidas de MOS, arcilla y la estructura del suelo, ocasionando problemas de compactación a largo plazo. Este conjunto de condiciones generaron disminuciones en las capacidades de retención de agua, arrebatándole a estos ecosistemas una de sus principales funciones, de tanta importancia para las poblaciones andinas. La degradación de estas laderas afecta además la fertilidad del suelo, viéndose afectadas las variables físicas más estables, lo que compromete seriamente su recuperación espontánea. Por otra parte, algunos autores aseveran que las pérdidas de MOS juegan un rol importante en el proceso de empobrecimiento del suelo (*Coello y col, sin año; Sarmiento y Smith, en prensa*). También asociamos la degradación claramente con bajos niveles de C, N y CIC, bajos contenidos de arcilla y mayores pH en comparación con el ecosistema natural (*Zuo y col, 2009; Sarmiento y Smith, 2011*).

4.4 EFECTO DE LA RETOMA DE SUELOS DEGRADADOS POR AGRICULTURA INTENSIVA

Finalmente analizamos la hipótesis 4 que propone que en las laderas retomadas (LR), donde se establece recientemente una agricultura intensiva sobre laderas trigueras degradadas, los valores de MOS serán mayores que en LD debido a la aplicación de enmiendas orgánicas. Estos suelos han de diferenciarse de aquellos con agricultura intensiva por el alto empobrecimiento de nutrientes que han sufrido, reflejándose en la baja CIC que deben poseer por las pérdidas sufridas de MOS. Es por esto que los altos aportes de materia orgánica que han obtenido las laderas retomadas podría resultar una buena estrategia de restauración del suelo.

Para el análisis de esta hipótesis tomamos como punto de referencia la ladera degradada y vemos como se han modificado por efecto de la retoma (Figura 4.3).

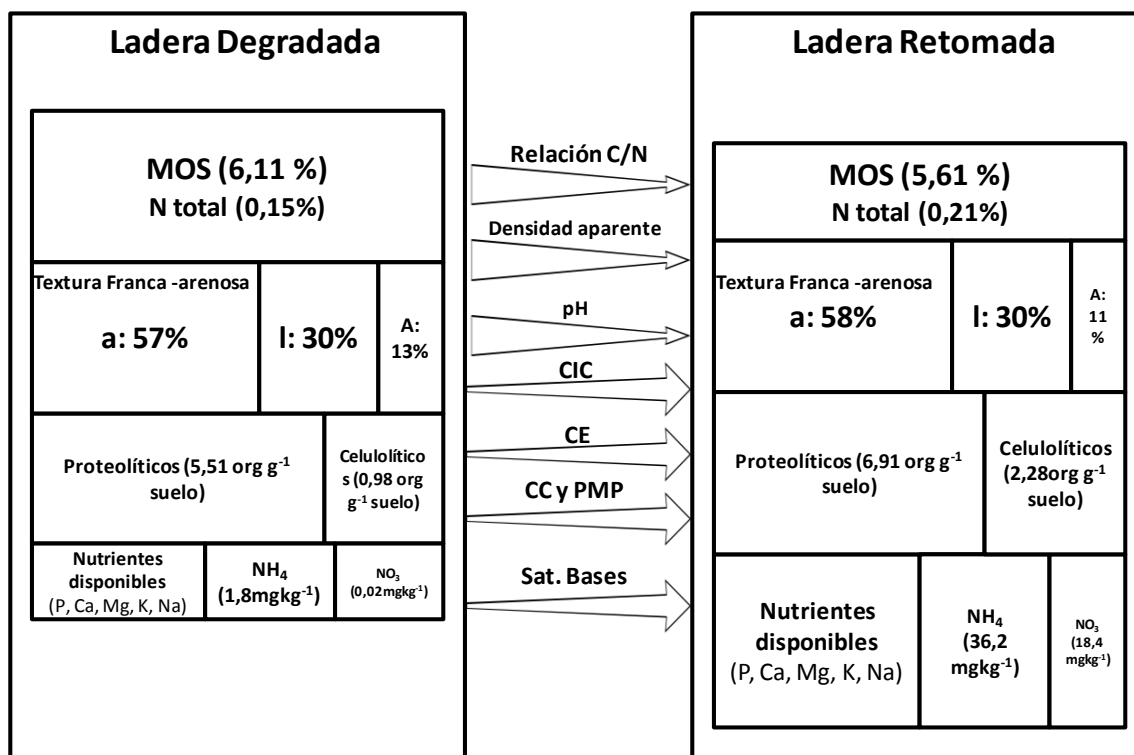


FIGURA 4.3. Análisis esquemático de los principales cambios edáficos ocurridos por la transformación de ladera degradada en ladera retomada. En las cajas se han representado los compartimentos mientras que las flechas representan propiedades, relaciones o flujos. Se indica los cambios por la dirección de las flechas o el cambio en el tamaño de las cajas.

Se encontraron en las LR los menores valores de MOS lo que indica que la retoma de los suelos degradados podría estar generando su pérdida sin que en el intervalo de tiempo desde la retoma se haya producido un mejoramiento de esta variable tal como se esperaba en la hipótesis de trabajo. Una posible explicación es que algunas prácticas agrícolas como el arado, el riego y la fertilización hayan estimulado la descomposición de la MOS original de estos suelos degradados sin que la incorporación de abonos orgánicos haya podido compensar estas pérdidas en ese intervalo de 5 años. Estos bajos contenidos de MOS también podrían deberse a la alta calidad de la MOS aplicada, pues para estos suelos también se han reportado los valores más bajos de la relación C/N ($15,76 \pm 1,54$), lo que le atribuye una naturaleza más lábil o de rápida descomposición al material orgánico presente. Por tanto observamos con la retoma un cambio en la calidad de la MOS como consecuencia de las incorporaciones de gallinazo (de rápida descomposición), que genera un balance negativo ya que las pérdidas de MOS por efecto de las prácticas agrícolas pudieran superar las ganancias por la adición de estos abonos orgánicos.

Los contenidos de arcilla resultaron bajos (Figura 4.3), similar a lo encontrado para SA y LD, con una textura franco –arenosa, en contraste con lo reportado para los suelos de páramo natural con textura franca (con contenidos de arcilla mayores); reflejando que la textura es una propiedad de difícil recuperación, si no es que sus cambios resultan irreversibles por las condiciones de estos suelos de altas pendientes, donde recuperar las fracciones más finas del suelo es prácticamente imposible una vez perdidas por la erosión.

Ambas condiciones de bajos contenidos de MOS y pérdidas irreparables de las arcillas, generan una disminución en la capacidad de retención de agua en estos suelos (CC y PMP) y en la capacidad de intercambio catiónico. En el caso del agua, dicha condición se presenta también en SA y LD, indicando que estas propiedades resultan de difícil recuperación una vez que ha habido intervención antrópica. Respecto a la CIC, fue menor que en PN y SA reflejando la poca recuperación de esta propiedad luego de la degradación (Figura 4.3).

La densidad aparente por su parte disminuyó respecto a lo encontrado en LD, aunque se mantiene por encima de la densidad de los suelos de páramo natural y con agricultura intensiva. Esto refleja que las prácticas agrícolas aunque no mejoran sustancialmente las condiciones de retención de agua en el suelo, disminuyen la densidad y aumentan la conductividad hidráulica, disminuyendo un poco la compactación en comparación con las LD. Ésto podría estar involucrado con algunas prácticas como el arado y la aplicación de las enmiendas orgánicas que mejoran la estructura del suelo.

Por otra parte, se encontraron valores de pH menores que los de SA y LD, reflejando que en estas parcelas no se está aplicando el encalado, práctica común del sistema agrícola intensivo actual. Sin embargo el pH no llega a ser tan ácido como en PN, probablemente debido a los bajos contenidos de MOS. Por otra parte, los valores de CE aunque son los más altos, no cruzan el umbral que los catalogaría como suelos con problemas de salinización (umbral máximo 4 dS m^{-1}) (Guitián y Carballas, 1976).

Respecto a los microorganismos, encontramos las poblaciones más grandes de bacterias heterótrofas, de proteolíticas y de celulolíticas que en los demás tipos de suelo evaluados. Así como también las mayores respiraciones. Esta mayor actividad microbiana podría ser el reflejo de los contenidos de MOS lábil aplicada. La presencia de estas grandes poblaciones bacterianas aceleran la tasa de descomposición de la necromasa, lo que se evidencia con el aumento de los contenidos de algunos nutrientes, que son liberados con la mineralización de la MOS. También sobre los altos

contenidos de bases puede estar influyendo la liberación de algunos elementos con la exposición del material parental que en algunos casos se encuentra desprovisto de protección. Así pues, se reportaron altos contenidos de P disponible, Ca, Mg, K, Na y un % de saturación de bases que excede ampliamente el 100% ($162,01 \pm 67,33$ %); en comparación con lo reportado para los suelos PN y LD que no reciben ningún tipo de manejo. Debe señalarse también que las altas respiraciones representan mayores pérdidas de C, lo que puede estar modulando la relación C/N; esto podría tener gran influencia sobre la calidad de la MOS y por tanto sobre su capacidad de almacenarse o perderse por descomposición en estos suelos.

Es importante considerar que las poblaciones microbianas resultaron ser sensibles al efecto del bloque (Tabla 3.4), donde es claro que las localidades de La Sierra Nevada (Campana y Mocoa) mostraron poblaciones de mayor tamaño que las presentes en el sierra de la Culata (Mitibibó y Los Apios); esto nos refleja que las grandes poblaciones de Bacterias, no necesariamente son características de la LR.

En cuanto a los contenidos de N mineral, se encontraron las mismas tendencias que en el PN y LD con una dominancia de la forma NH_4^+ sobre NO_3^- , lo que coincide muy bien con los valores más ácidos de pH (*Brady y Weil, 1999*), caso contrario a lo encontrado en los suelos con agricultura intensiva, por lo que se asume que hay algún factor que está inhibiendo la nitrificación en estos suelos.

Encontramos que las laderas retomadas aun no parecen comenzar a recuperarse luego de la degradación que han sufrido. Dichas prácticas podría tener efectos positivos a largo plazo Así la incorporación de abonos orgánicos y de fertilizantes pudieran ayudar a restaurar la materia orgánica perdida, además de mejorar la estructura del suelo y por tanto la capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica del mismo, disminuyendo a su vez la densidad aparente y la escorrentía; aunque no todos estos cambios se observan inmediatamente. Estos contenidos de MOS también mejoran las CIC, que aumenta sustancialmente con la necromasa en comparación de lo que puede mejorar con las arcillas, reteniendo algunas formas disponibles de cationes como K^+ , Ca^{++} y Mg^+ (*Brady y Weil, 1999; Sarmiento y Smith, 2011*).

Las grandes poblaciones microbianas también contribuyen con todo el ciclado de los nutrientes, liberando a los que están atrapados en formas orgánicas dentro de la necromasa; el arado también es influyente en la liberación de nutrientes, por exponer el material parental y dejarlo propenso a la meteorización, además de destruir la MOS, facilitando su mineralización. Todo esto coincide finalmente con las condiciones más favorables para el desarrollo vegetal, lo que es confirmado cuando se observan los valores más altos de biomasa vegetal de maíz obtenida en el bioensayo para estos suelos retomados. Aunque no se mejoran sustancialmente las condiciones físicas del suelo (retención de agua); las condiciones químicas y biológicas mostraron buenas tendencias, con altos contenidos de nutrientes y mucha actividad biológica. Sin embargo estas condiciones para las propiedades químicas y biológicas podrían ser el reflejo de ambientes inestables, con continuas entradas de nutrientes que convierten a este ecosistema en un ente rico pero muy vulnerable al empobrecimiento por la falta de protección de sus fuentes de nutrientes (material orgánico, material parental).

4.5 DISCUSIÓN DEL DISEÑO DE MUESTREO

El diseño de muestreo implementado en este estudio representó la mejor alternativa que encontramos para el momento y fue concebido como un compromiso entre: por una parte, realizar el mayor número de réplicas posible y por la otra determinar un conjunto importante de parámetros físicos, químicos y biológicos, todo esto en el contexto de un trabajo especial de grado. Este diseño de muestreo, presenta, sin embargo, algunas limitaciones para el análisis de las condiciones del suelo y sus tendencias de cambio bajo diferentes historias de uso, entre las que cabe mencionar: 1) la heterogeneidad ambiental de los suelos de montaña tropical que produce cierto “ruido” en la interpretación de los resultados; 2) el pequeño número de réplicas consideradas para este trabajo ($n=4$) que en algunos casos limitó el análisis estadístico y 3) los posibles errores en la información que se obtuvo sobre las historias de uso de cada uno de los suelos evaluados. Algunas de las ventajas de este diseño de muestreo se mencionan al final de esta sección.

4.5.1 La Heterogeneidad ambiental típica de ecosistemas de Alta montaña tropical

Uno de los principales problemas metodológicos que surgen al analizar los cambios en suelos de páramo andino, es la alta heterogeneidad espacial característica de la montaña tropical, debido a la gran diversidad topográfica de estas regiones, la cual impone limitaciones a la utilización de enfoques sincrónicos que se basan en la sustitución del tiempo por el espacio, es decir, en comparar suelos diferentes en un momento de tiempo dado para reconstruir procesos que pueden ocurrir en décadas o cientos de años (*Abreu y col, 2009*). Por otra parte la heterogeneidad ambiental puede introducir diferencias entre los suelos debidas a otros factores distintos a los resultantes de las historias de uso evaluadas, por ejemplo los suelos ubicados a mayor altitud pueden tener menos materia orgánica, como es el caso de los páramos, lo que estaría enmascarando un poco la disminución de la misma con la transformación (*Gonzales, 2004*). Por otro lado, los altos contenidos de MOS presente en estos suelos pueden estar enmascarando los posibles cambios ocurridos a corto plazo, como por ejemplo en el caso de la ladera retomada (*Abadín y col, 2002; Buytaert y col. 2005*).

El enfoque sincrónico intrínsecamente está incluyendo la heterogeneidad espacial, al comparar las historias de uso en suelos diferentes; por lo tanto, para solventar un poco esta limitación *Abadín y col, (2002)* proponen muestrear series de parcelas que estén bajo las mismas condiciones ambientales (adyacentes unas con otras) representando las diferentes situaciones que se buscan analizar y repartir las réplicas entre diferentes series, lo que permite eliminar la variabilidad debida a la serie (en este caso *localidad*) al hacer el análisis estadístico utilizando permanovas de dos vías (análisis de varianza), que nos permitieron separar la variabilidad atribuida a la localidad. Este fue el enfoque que se siguió en este trabajo, seleccionando cuatro series o localidades y dentro de cada una, tratando de homogeneizar seleccionando parcelas con exposición, altitud y pendiente similar (Tabla 2.1) ya que estas diferencias ambientales podrían generar cambios significativos en algunas de las propiedades edáficas determinadas en este estudio. Sin embargo, aun persistió cierta variabilidad dentro de cada serie debido a la imposibilidad de encontrar parcelas bajo condiciones idénticas.

El tratamiento páramo natural (PN) se consideró como línea base para establecer la dirección y magnitud de los cambios observados con las transformaciones. Sin embargo es importante recalcar que entre los cuatro páramos estudiados hay diferencias que no son despreciables en los valores de sus variables edáficas. Esta situación no afecta la comparación entre los tratamientos, pues los permanovas de dos vías eliminan dicho efecto (efecto bloque), pero sí afecta al índice de

Degradación, donde no se incluye una corrección por línea base. Por otra parte, el índice integrado de Calidad no estará afectado por este problema, ya que se ha realizado omitiendo la localidad Mocao debido a que fue la localidad donde se encontraron más comportamientos anómalos, lo que podría atribuirse a que se consideró un páramo natural falso (Figura 3.1).

4.5.2 Número de réplicas

Respecto a la cantidad de réplicas muestreadas; cuatro repeticiones de cada situación (tratamiento) en localidades diferentes puede considerarse un poco justo para probar estadísticamente las diferencias obtenidas ya que basta con que una sola réplica se comporte de forma diferente para que las tendencias en su conjunto no sean significativas, como ocurrió en el caso de Mocao. Por otro lado, las interacciones entre localidad y tratamiento no se pueden analizar estadísticamente, pues no se realizaron réplicas de cada tratamiento dentro de la misma localidad; por lo tanto estos resultados son útiles principalmente para comparar entre las diferentes situaciones (tratamientos) evaluadas y para analizar las tendencias características de cada transformación ocurrida en las zonas adyacentes a Mucuchíes, ubicadas dentro del Bolsón seco.

La limitación del número de réplicas ($n=4$), el gran número de variables edáficas a analizar en cada suelo y el trabajo relativamente importante requerido para escoger las parcelas en condiciones equivalentes y realizar el muestreo de campo, hicieron necesario llegar a este compromiso. Consideramos que pese a las limitaciones, pudieron verse con claridad muchas tendencias. En el caso de la textura, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas al comparar los cuatro sitios; aunque probablemente si lo serían si es eliminado Mocao de las permanovas, pues se ha encontrado que el supuesto páramo natural en esta localidad sufrió pérdidas de arcilla que pudiera interferir con los análisis estadísticos realizados (Figura 3.1). De haber tenido más réplicas probablemente más tendencias habrían podido demostrarse estadísticamente a nivel de las propiedades físicas. Por ejemplo, *Sarmiento y Smith (en prensa)* muestran diferencias muy significativas en el contenido de arcilla entre suelos de páramo natural y suelos de laderas degradadas en el Valle Alto del Chama pero con 92 parcelas en total.

4.5.3 La historia de uso de cada suelo

Una limitación importante para escoger las parcelas y discutir los resultados son los posibles errores en la información de la historia de uso, la cual se obtuvo a través de las imágenes y por conversaciones informales y poco sistemáticas con los habitantes. Sin embargo, por razones de tiempo, no fue posible indagar más a profundidad la historia a través de una encuesta que nos hubiera permitido conocer el tiempo bajo uso agrícola, el tiempo exacto de retoma, verificar que los páramos nunca fueron cultivados, conocer prácticas agrícolas específicas (momento de la última aplicación de insumos antes del muestreo de suelo y cantidades utilizadas). Recomendamos ampliamente tener en cuenta estos aspectos para estudios sucesivos de interpretación de cambios en el suelo. El problema evidente que se presentó relacionado con este aspecto fue una mala escogencia de las parcelas en uno de los sitios de estudio (Mocao).

Este tipo de limitación es mencionada por otros autores en los páramos de Ecuador, donde quieren comparar suelos de páramo natural (“no intervenido”) con suelos que son explotados con producción agrícola; lo cual se dificulta debido a la alta dinámica que ha habido en los usos de estas tierras y la falta de información o base de datos sobre las mismas, lo que hace un poco misterioso el pasado

particular de cada parcela evaluada y más difícil la interpretación de sus resultados (*Buytaert y col, 2005*).

4.5.4 Beneficios y alcances del Diseño de Muestro

A pesar de todas las limitaciones mencionadas, el diseño de muestreo permitió obtener información a nivel Regional, en donde se incluyen las variaciones que se puedan presentar en las diferentes localidades consideradas, incluyendo dos localidades en la Sierra de La Culata y dos localidades dentro de la Sierra Nevada de Mérida. De lo contrario la información interpretada podría verse sesgada por las condiciones muy particulares de la localidad que se está muestreando. Algunas de estas variaciones atribuidas a la localidad son mostradas en la Tabla 3.4 (en los resultados). Información previa disponible, como la de Felicien (2008) que comparaba tres suelos (ladera degradada, paramo y suelo agrícola), escogidos en diferentes sectores del valle, no permitió concluir si las diferencias entre ellos se debían a efectos regionales o al uso de la tierra. En ese sentido nuestro diseño de muestreo permite atribuir a los tratamientos una serie de cambios importantes en las propiedades edáficas y al mismo tiempo obtener conclusiones generalizables a escala regional, por lo que representa un avance en comparación con trabajos anteriores.

4.6 ANÁLISIS DEL ENFOQUE DE INDICADORES Y DEL ÍNDICE DE CALIDAD EDÁFICA

4.6.1 Complejidad de la construcción de un índice para evaluar el estado del suelo

En la construcción de un índice para analizar el estado del suelo, surgieron algunas limitaciones al momento de buscar un método sistemático generalizado; ya que evaluar la calidad edáfica con un único valor resulta complicado cuando se busca reflejar la condición de un sistema tan complejo, con tantos compartimientos dinámicos que interactúan entre sí y que cumple diferentes funciones tanto en el almacenamiento de carbono, la regulación del balance hídrico, el ciclado de nutrientes y la fertilidad, entre otras. Nuestra base de datos, que contiene las 42 variables, presenta un alto grado de redundancia en la información ya que muchas de estas variables están altamente correlacionadas. En este sentido, en la construcción de los índices se busca una reducción del número de variables hasta conservar aquellas que más información nos puedan dar sobre el aspecto edáfico que pretende evaluar dicho índice.

Se plantearon varios índices con diferentes enfoques, partiendo de los lineamientos de *Karlen y col, 1998; Glover y col, 1996 y 2000; Diack y Stott, 2001; Arshad y Martin, 2002; Amacher y col, 2007; Cantú y col, 2007*, quienes proponen que diferentes índices pueden ser construidos para evaluar aspectos particulares de la calidad edáfica, como índices que evalúan la fertilidad del suelo, su estado de degradación, la resistencia a la degradación física, la capacidad de amortiguación de daños causados por contaminantes ambientales químicos, su resiliencia ante disturbios, la calidad del agua subterránea drenada de estos suelos, entre otros. Estas propuestas incluyen la evaluación de aspectos que consideran tanto el tamaño de algunos compartimientos (estructura) como algunos procesos específicos (funcionamiento).

Además existen diferentes formas de evaluar el estado del suelo, (1) comparando las propiedades edáficas en parcelas con diferentes sistemas de manejo o (2) comparando el sitio “problema” con

lugares similares que no muestran el problema y representan condiciones óptimas, según lo propuesto por *Glover y col, 1996; Chia Hsing y col, 2006*. Una combinación de ambos enfoques se utilizó en este trabajo, ya que se compararon tres suelos manejados con el suelo de páramo que se consideró como la línea base. De esta manera construimos tres índices con enfoques diferentes, los dos primeros evaluaron aspectos específicos y el tercero muestra un análisis integrado con varias funciones y la posibilidad de darle un enfoque diferente al índice según la distribución que se realice de los pesos relativos de cada función.

4.6.2 Índice de Fertilidad del Suelo (IFS)

El índice de fertilidad del suelo, planteado también por *Andrews y col, (2002); Chia Hsing y col (2006)*, está basado en la productividad o desarrollo de biomasa vegetal de un cultivo estándar. El cálculo se hizo en base a la biomasa aérea del maíz (B_{Ma}) considerada como variable dependiente. El producto de la regresión múltiple lineal (

Índice de Fertilidad del Suelo) arrojó como indicadores el contenido de NO₃, CE, CH y PMP. Es decir que estas fueron las variables, en ese orden, que mejor explicaron el comportamiento de la B_{Ma}. En este sentido, *Andrews y col, (2002)*, mostraron en su índice de fertilidad la CE como uno de sus indicadores del tipo más es mejor similar a lo que encontramos en este estudio.

Al evaluar los resultados del IFS encontramos una mejoría en la fertilidad de los suelos que reciben un manejo agrícola, similar a lo encontrado por *Chia Hsing y col (2006)* reconociendo además valores leve pero significativamente más altos en LR (6,48±0,63a) sobre SA (6,40±0,73b). Esto se atribuye a los mayores contenidos de NO₃ y CE encontrados en LR. Sin embargo, aunque los altos contenidos de nitrato y la alta CE indiquen mejor disponibilidad de nutrientes y mejores la producción del maíz, pueden tener efectos negativos en estos suelos donde la CH es alta, estimulándose la pérdida de nutrientes vulnerables al lavado como el NO₃⁻. Esta situación se confirma con la baja capacidad de retener agua en estos suelos que reflejan que el agua infiltrada podría estar generando pérdidas de nutrientes (Tabla 3.10).

4.6.3 Índice de Degradación del Suelo (IDS)

Este índice reúne cinco indicadores relacionados con el segundo eje del ordenamiento, los cuales son de naturaleza física y química (MOS, CIC, arcilla, Densidad aparente, Relación C/N, cada uno con un peso relativo de 0,20) y se asocian principalmente con la retención de agua y nutrientes, y con la movilidad del agua dentro del compartimiento suelo (*Chia Hsing y col, 2006*). Su aplicación a cualquier suelo del área de estudio puede permitirnos evaluar el estado de degradación o monitorear la recuperación bajo prácticas específicas de restauración ecológica. De estas cinco variables, cuatro serían susceptibles de recuperarse a través de prácticas de restauración asistida (con excepción de la arcilla). En las laderas retomadas el índice indica que no ha habido una recuperación apreciable del nivel de degradación en su conjunto, aunque individualmente algunas de las variables si han cambiado. En el SA vemos que si bien ha habido una degradación, ésta es mucho menor; lo que implica una evaluación más bien positiva del sistema de manejo en cuanto a su efecto sobre el suelo y posible sustentabilidad.

En los PN se encontró el mayor puntaje del contenido de arcilla (0,20±0,02) el cual no parece recuperarse una vez perdido, lo que se reflejó en puntajes más bajos y similares en SA (0,11±0,03),

LD ($0,11\pm 0,06$) y LR ($0,11\pm 0,02$). Estos bajos puntajes para la arcilla en los suelos *no naturales*, mostraron la sensibilidad de este indicador ante la intervención antrópica (*Islam y Weil, 2000*). Dichas pérdidas podrían ser generadas por prácticas agrícolas no favorables en estos ambientes de altas pendientes, como el arado y el riego.

El puntaje del contenido de MOS fue mayor en los PN ($0,15\pm 0,03$) y disminuyó progresivamente en los demás tratamientos, con SA ($0,11\pm 0,05$) > LD ($0,05\pm 0,03$) > LR ($0,03\pm 0,02$). SA perdió poca MOS probablemente por las constantes aplicaciones de enmiendas orgánicas que reponen las pérdidas causadas por el manejo y la cosecha, sin embargo se observaron disminuciones de MOS, similar a lo reportado por otros autores en suelos cultivados (*Karlen y col, 1998; Islam y Weil, 2000*). En LD, la baja cantidad de MOS contenida en el suelo probablemente se conserva por su naturaleza recalcitrante, reflejada con los bajos score de la relación C/N ($0,09\pm 0,06$). Llama la atención que las LR presentaron los menores contenidos de MOS; esto podría ser consecuencia de la estimulación de la descomposición de la MOS de los suelos degradados cuando son cultivados, por el rompimiento de la protección física debido al arado y por otra parte las altas tasas de descomposición de las enmiendas orgánicas agregadas que sólo permiten una acumulación muy lenta de MOS. El cambio de calidad de la MOS en estas LR se evidencia por el alto score de la relación C/N ($0,17\pm 0,01$) (*Islam y Weil, 2000*). Además, otras prácticas agrícolas como el riego y el arado en terrenos de altas pendientes no contribuyen con la acumulación de material orgánico en un corto plazo de tiempo (5 años es lo considerado en promedio la retoma que tienen los suelos analizados en este trabajo).

La CIC parece haber aumentado con el manejo agrícola de los suelos, encontrando PN < SA y LD < LR. Los SA ($0,15\pm 0,02$) con mayores scores para la CIC que LR ($0,08\pm 0,03$) además, podría ser debido a que las LR provienen de suelos empobrecidos (LD) donde se perdieron grandes contenidos de MOS y de arcilla.

Los menores scores para la densidad aparente se encontraron en los SA ($0,12\pm 0,07$) y PN ($0,10\pm 0,03$), como consecuencia de los mayores contenidos de MOS presente (*Brady y Weil, 1999; Glover y col, 2000; Cantú y col, 2007*), y en los SA densidades aun menores debido a prácticas agrícolas como el arado (aunque a largo plazo estas prácticas generan la compactación del suelo, como fue el caso de LD).

La relación C/N, con scores más altos en los SA ($0,16\pm 0,00$) y LR ($0,17\pm 0,01$), mostró la mayor calidad de la MOS y por tanto, tasas más altas de descomposición del C, que además son estimuladas por prácticas aplicadas en estos suelos como el arado y la fertilización, que promueven la oxidación de la MOS presente (*Diack y Stott, 2001*). A su vez, se observó una clara distinción entre los contenidos de MOS en SA ($0,11\pm 0,05$) y LR ($0,03\pm 0,02$), y aunque ambos tratamientos mostraron bajas relaciones C/N, SA almacena mayores cantidades porque estos suelos no han sufrido un proceso de empobrecimiento como las LR, que se están desarrollando a partir de eventos de degradación. Por otra parte, la recuperación de la CIC en LR en comparación con LD, podría ser una evidencia de que hay una lenta recuperación de estos suelos, aunque la tasa de asimilación de la MOS parece ser lenta en estos suelos.

En general, encontramos para el índice de degradación, los puntajes menores en PN ($0,31\pm 0,13c$) y los mayores en LD ($0,65\pm 0,21a$) evidentemente, ya que estos dos tratamientos se usaron para reconocer el gradiente de degradación en el ACP (Figura 3.2). Y entre los suelos cultivados encontramos que SA ($0,36\pm 0,19bc$) se acerca más al PN, mostrando menores evidencias de degradación en comparación con LR, estas condiciones se ven mejoradas por las aplicaciones de

MOS al cultivo que reponen las pérdidas causadas por el arado, el riego y la cosecha. Por otra parte las LR ($0,53 \pm 0,10ab$) mostraron una disminución del índice respecto a LD, reflejando una posible recuperación del estado de estos suelos, respecto a algunas propiedades químicas (CIC y C/N) y físicas del suelo (Db), que son mejoradas por la aplicación de materiales orgánicos y la labranza.

4.6.4 Índice integrado de Calidad del Suelo (ICS)

4.6.4.1 SELECCIÓN DE LAS FUNCIONES Y LOS INDICADORES PARA CONFORMAR EL ÍNDICE

Para la construcción de un índice integrado, se consideraron algunas funciones del suelo propuestas por *Karlen y col, 1998; Glover y col, 2000; Diack y Stott, 2001; Arshad y Martin, 2002; Amacher y col, 2007; Cantú y col, 2007*. Estas fueron la *Capacidad de Retener Agua y Nutrientes*, *La Resistencia a la Degradación*, y *Las Condiciones para el Desarrollo Óptimo Vegetal*, todas muy bien relacionadas entre sí y de gran importancia para el buen funcionamiento del ecosistema.

En la construcción de este índice se omitieron las variables biológicas por varias razones, los grupos de microorganismos y las incubaciones para la respiración, representaron un complejo protocolo de laboratorio que requiere de un largo plazo de tiempo para la obtención de los resultados, lo cual resulta poco práctico en algunas situaciones; por otra parte estas son variables que responden a corto plazo ante algunas prácticas agrícolas, así que se enmascara un poco las condiciones que le atribuyen al suelo mayor sustentabilidad, lo que podría resultar más útil al evaluar diferentes sistemas de manejo (*Diack y Stott, 2001*) y finalmente, las poblaciones de BHT y Prot, y la relación Oligo/Copiotrofos resultaron mostrar una alta variabilidad entre localidades o “Efecto del Bloque” (Tabla 3.4) que hace difícil la interpretación de estos parámetros en suelos de gran heterogeneidad ambiental.

El análisis de clasificación nos mostró que algunas variables hídricas (CC, PMP, W y Q) muestran comportamiento similar a los contenidos de MOS y N total, y además se agrupan con la arcilla y el limo, reflejando una asociación con la retención de agua del suelo, por lo que se consideraron para conformar la función 1 del ICS.

Entre las variables finales incluidas resalta la presencia en casi todas las funciones de la MOS, la cual puede ser considerada como un “súper indicador”, siempre del tipo “más es mejor”. Esta refleja la calidad de diferentes aspectos del suelo. Así en la función de capacidad de retener agua y nutrientes fue incluida por su textura coloidal y cargas negativas que posee en la superficie de sus partículas, lo que provee las condiciones para el mejoramiento de esta función. En el caso del proceso de infiltración también fue considerada la MOS por mejorar la estructura del suelo y disminuir la compactación, permitiendo la entrada del agua al suelo y disminuyendo la escorrentía y la consecuente erosión. Finalmente fue considerada también en la función de almacenamiento de C ya que ésta es la principal fuente de C en los suelos. Sin embargo, en este caso el contenido de C debe ser interpretado en conjunto con la relación C/N que refleja la calidad de esta MOS, pues la materia orgánica de naturaleza recalcitrante (mayor relación C/N) es mejor almacenada que la más lábil y de rápida descomposición (*Brady y Weil, 1999*). Estas últimas dos funciones en las que se consideró la MOS, forman en conjunto una función más general (del nivel 1 Tabla 3.13) que se refiere a la *resistencia ante la degradación*, por lo que estamos considerando que son muy importantes los contenidos de MOS en los suelos para resistir la degradación, que fue lo que no se previó durante los

cultivos de trigo en la época de la colonia donde no hubo un manejo dirigido hacia su mantenimiento en el tiempo (*Monasterio, 1980; Sarmiento y Smith, 2011*). El contenido de MOS presente en el suelo es un buen indicador de calidad edáfica, por estar asociados con tantas funciones importantes como fueron mencionadas; por lo que es recomendado en la construcción de un índice de calidad edáfica según *Glover y col, 2000; Diack y Stott, 2001; Andrews y col, 2002; Arshad y Martin, 2002; Chia Hsing y col, 2006; Amacher y col, 2007; Cantú y col, 2007*.

Otra variable que se repitió en varias funciones de nuestro índice integrado fue la densidad aparente, tanto en el proceso de infiltración como en el de condiciones físicas óptimas para el desarrollo vegetal. A ambas funciones es considerada del tipo “menos es mejor” ya que las menores densidades en el suelo permiten un mayor movimiento de agua y el crecimiento radicular se ve favorecido por el espacio disponible y los mejores flujos de agua y de aire (*Brady y Weil, 1999*).

También proponemos el uso de una variable más versátil, como el pH, en el sentido que es del tipo menos es mejor dentro de una función y la tendencia contraria para otra función. En la función, capacidad de retener agua y nutrientes fue considerado del tipo “menos es mejor” ya que en suelos moderadamente ácidos disminuyen algunas pérdidas como la desnitrificación y la volatilización en relación con suelos cercanos a la neutralidad, por tanto este enfoque se explica principalmente por la capacidad del pH ácido de retener el nitrógeno (*Brady y Weil, 1999*). Por el contrario, en la función de disponibilidad de nutrientes el pH fue considerado del tipo más es mejor, ya que al aumentar, está reflejando que hay mayores contenidos de Ca y Mg en el complejo de intercambio y por otro lado, el P está disponible para las plantas cuando está en medios neutros ya que en medios ácidos tiende a insolubilizarse.

4.6.4.2 PROPUESTA DE LOS DOS MODELOS DE ÍNDICE.

4.4.3.1. MODELO 1: hace énfasis en la calidad ambiental, evaluando las funciones del suelo relacionadas con su capacidad de retener agua y nutrientes y de resistir la degradación. Se evalúa utilizando únicamente indicadores físicos y químicos menos sensibles a corto plazo al efecto del manejo agrícola.

4.4.3.2. MODELO 2: de Calidad integral, incluyendo las condiciones para la producción vegetal, como el efecto del manejo que genera cambios en algunos ciclos, mejorando las condiciones para la productividad. Aparte de los indicadores del modelo 1, se incluyen algunas propiedades químicas moduladas por el manejo agrícola.

Los dos modelos de índice aplicados con los dos sets de indicadores (básicos y sustitutos), arrojaron resultados que podrían sintetizarse en tres aspectos principales al comparar las tendencias entre los tratamientos.

1) Una disminución progresiva en la calidad edáfica siguiendo el orden $PN > SA > LD > LR$, que se vio modulada principalmente por la disminución en la capacidad de retención de agua y nutrientes (función 1), con indicadores básicos y un menor *almacenamiento de C* (función 2.2), con ambos sets de indicadores; también se reflejó en los resultados finales del ICS utilizando el Modelo 1 con indicadores Básicos. Lo que nos está reflejando que las condiciones edáficas asociadas a la retención de agua, nutrientes y C parecen no recuperarse una vez intervenido el suelo. Esto podría estar muy relacionado con la arcilla que no se recuperó una vez perdida, por algunos manejos no

convenientes en estas altas pendientes, como el arado. La misma tendencia a la disminución de la calidad edáfica en los suelos con agricultura es reportada por otros autores (*Islam y Weil, 2000; Diack y Stott, 2001*).

2) En algunas funciones encontramos una mejoría de las LR sobre las LD, que se ve reflejada en la capacidad de retener agua y nutrientes (función 1), cuando es determinada con Arena, CC y Saturación de Bases, las dos últimas mayores para LR; en la infiltración (función 2.1), con mayor CH y menor Db en LR; respecto a las condiciones físicas del suelo (función 3.1), considerando densidades (indicadores sustitutos: Db y Da), resultaron menores densidades en LR y en la disponibilidad de los nutrientes (función 3.2), fue mayor para LR. Estos cambios en los suelos retomados luego de la degradación (LR) podrían estar siendo generados por prácticas como: el arado que disminuye la compactación y mejoran la infiltración (*Glover y col, 2000*); la aplicación de enmiendas orgánicas ricas en nutrientes y fertilizantes minerales (*Diack y Stott, 2001; Amacher y col, 2007*). Aunque, el arado podría estar generando pérdidas de la MOS (*Chia Hsing y col, 2006*). En las laderas retomadas, aunque se encontraron mejores condiciones nutricionales que favorecen la productividad, no se recuperan apreciablemente los contenidos de MOS almacenada y todos los beneficios que esto tiene sobre estos suelos (*Islam y Weil, 2000*). De hecho *Chia Hsing y col, (2006)* mencionan que prácticas como el arado, tienden a enmascarar los beneficios que podría estar proveyendo la MOS aplicada, ya que difícilmente esta puede almacenarse bajo estos manejos. En nuestro caso bien pudiera haber una primera etapa posterior a la retoma en que el balance de carbono del suelo es negativo, por rompimiento de la protección física a la MOS, pero esta situación podría revertirse posteriormente, aspecto que no puede comprobarse con nuestros datos.

3) Finalmente encontramos también que para algunas de las funciones, el suelo agrícola presenta mejores puntajes que el páramo natural, como en la capacidad de infiltración (función 2.1), en las condiciones físicas del suelo (función 3.1) y en la disponibilidad de nutrientes (función 3.2), reflejando así, como es de esperarse que el manejo agrícola mejora las condiciones de estos suelos respecto al movimiento de agua y favorece las condiciones de disponibilidad de nutrientes para la producción agrícola (*Glover y col, 2000*). Esto podría deberse a las aplicaciones de MOS que mejoran la estructura del suelo, disminuyen las densidades y por tanto la infiltración, además de representar una fuente de nutrientes disponibles; también el arado podría estar estimulando la mejor infiltración en estos suelos, disminuyendo la compactación y por otra parte las aplicaciones de fertilizantes minerales incrementan inmediatamente el contenido de nutrientes necesarios para la mayor productividad (*Glover y col, 2000; Diack y Stott, 2001; Andrews y col, 2002; Chia Hsing y col, 2006; Amacher y col, 2007*). Sin embargo, el SA no muestra algunas de las condiciones que se consideran más importantes para darle sustentabilidad a estos suelos, o mayor resistencia a la degradación; puesto que podemos observar que no mejoran las capacidades de almacenar C, características de estos ecosistemas. Tampoco se ven favorecidas las condiciones que le permiten retener mayores contenidos de agua y de nutrientes en el suelo, que es lo que observamos con los bajos contenidos de MOS que logra acumular LR, lo que puede generar pérdidas de algunos elementos fácilmente cuando hay muchos nutrientes disponibles en el medio (*Chia Hsing y col, 2006*).

Encontramos que prácticas como el arado mejoran significativamente las propiedades de infiltración en los suelos manejados, pero al parecer esto no es suficiente para mantener el buen funcionamiento de estos suelos a largo plazo, pues algunos autores también han encontrado la compactación de los suelos por pérdidas de MOS, generadas por el arado entre otras prácticas agrícolas (*Diack y Stott, 2001*).

Al comparar los modelos 1 y 2 del índice, encontramos que el modelo 1 ubica las LR por debajo o al nivel de las LD, mientras que en el modelo 2, al considerar la función de condiciones óptimas para el desarrollo vegetal, las LR muestran mejorías en sus condiciones edáficas, respecto a las LD. De esta manera, consideramos que el manejo agrícola resulta necesario para la recuperación de los suelos degradados, al menos para la producción vegetal, porque las propiedades que le permiten retener agua y nutrientes y resistir la degradación, son de muy lenta recuperación (como los contenidos de MOS almacenada).

4.6.4.3 ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE AMBOS SETS DE INDICADORES

Al analizar los dos sets de indicadores utilizados, encontramos que hay algunas diferencias al evaluar el índice con el set básico y el set de sustitutos. Estas diferencias se deben a que los indicadores sustitutos no solamente están siendo influenciados por el indicador básico; por ejemplo en el caso de la función 1, la sustitución de MOS por CC a pesar del alto coeficiente de correlación que hay entre estas dos variables, acarreó algunos cambios en los resultados, pues la MOS perdida en LD lentamente se recupera en los suelos que son manejados mientras que la CC puede recuperarse más rápidamente por la utilización de prácticas como el arado.

Es importante señalar que estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio (*Cantú y col, 2007*). Una ventaja de este índice es que la flexibilidad de este enfoque a través del ajuste de los pesos asignados a las funciones del suelo, permiten aplicar el índice a diferentes regiones y sistemas de cultivo (*Glover y col, 2000*).

5 CONCLUSIONES Y SÍNTESIS FINAL

A modo de síntesis, hemos retomado las preguntas planteadas en la introducción, intentando responderlas a la luz de los resultados obtenidos.

5.1 ¿QUÉ CAMBIOS HAN OCURRIDO EN EL SUELO DEL PÁRAMO ANDINO COMO CONSECUENCIA DE LA DEGRADACIÓN CAUSADA POR EL SISTEMA TRIGUERO?

Los suelos agotados por el ciclo triguero mostraron fuertes disminuciones en los contenidos de MOS y de arcilla, generados probablemente por una fuerte erosión consecuencia del arado reiterado sobre estas altas pendientes, además de la ausencia de la aplicación de enmiendas orgánicas, lo que podría haber mantenido la fertilidad de los mismos. Esto a su vez ocasionó el deterioro de la estructura del suelo, una disminución en la CIC y contenidos de nutrientes y por lo tanto la pérdida de algunas de sus funciones, como son la capacidad de retener y movilizar agua y nutrientes para el desarrollo óptimo de la vegetación, lo que se expresa con las menores producciones de biomasa de maíz obtenidas para estos suelos en el bioensayo realizado bajo condiciones controladas. Estas condiciones parecen no mejorar espontáneamente con el abandono de estas parcelas, pues estos suelos presentan sucesiones detenidas en el tiempo según *Sarmiento y Smith (2011)*, las cuales requerirían de prácticas de restauración asistida para su mejoramiento.

5.2 ¿QUÉ PROPIEDADES EDÁFICAS DEBEN RECUPERARSE PARA RESTAURAR LOS SUELOS DEGRADADOS?

El estudio de estas laderas degradadas por la producción triguera, ha reflejado que uno de los problemas más significativos en estos suelos ha sido la pérdida de la MOS que cumple un papel crucial sobre la calidad de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas productivos. Algunas de las propiedades asociadas a dicha transformación son la capacidad de retención de agua (CC y PMP) y nutrientes, que mejoran eventualmente con la recuperación de dicho compartimiento en el suelo. Por otra parte, es importante la recuperación de los flujos de aire y agua dentro del sistema suelo (conductividad hidráulica mayor y densidad aparente menor) que mejoran el ambiente físico para el desarrollo de las plantas. Las poblaciones microbianas del suelo aunque se ven muy inhibidas con la degradación (menores respiraciones), parecen reponerse rápidamente con el manejo agrícola implementado. Por tanto, resulta de mayor importancia, enfocarse en el mejoramiento de las condiciones físicas de estos suelos que le atribuyen una mayor resistencia ante la degradación a dicho sistema.

5.3 ¿QUÉ EFECTO TIENE EL SISTEMA AGRÍCOLA ACTUAL SOBRE EL SUELO CONSIDERANDO LA SUSTENTABILIDAD DEL SISTEMA?

El sistema agrícola intensivo actual, practicado en los páramos andinos de Venezuela; ha mostrado leves disminuciones en la calidad edáfica. El cambio más comprometedor en términos de sustentabilidad que encontramos es la disminución en la cantidad de arcillas, la cual revela que existen procesos erosivos de magnitud importante, relacionados probablemente con el arado y el riego por aspersión. De mantenerse estos procesos erosivos podría estarse comprometiendo la sustentabilidad, en el caso que las tasas de pérdida de suelo excedan a la de su formación, se produciría una disminución progresiva de la capa arable. En este sentido recomendamos prácticas de control de erosión, como el terraceo o barreras vivas y el cambio a sistemas de riego de microaspersión. A pesar de este aspecto negativo, la agricultura intensiva parece mantener la productividad y calidad de los suelos gracias a la inclusión de importantes aplicaciones de enmiendas orgánicas dentro del sistema de manejo, que han evitado pérdidas importantes de MOS y sus efectos derivados sobre otras funciones edáficas, diferenciando este sistema de cultivo del sistema triguero. Sin embargo, la aplicación exagerada de algunos fertilizantes minerales podría estar ocasionando su pérdida y por tanto generando consecuencias ambientales negativas.

5.4 ¿ES LA RETOMA DE LAS LADERAS DEGRADADAS POR LA AGRICULTURA, UNA POSIBLE ESTRATEGIA PARA RECUPERAR LOS SUELOS AGOTADOS POR EL CICLO TRIGUERO?

La evaluación de las laderas degradadas incluidas en el sistema agrícola con la implementación de prácticas típicas de la agricultura actual, no consideradas en el ciclo triguero, como son la aplicación de cantidades importantes de enmiendas orgánicas, que aunque no reponen la estructura del sistema completamente, permiten la recuperación de algunas funciones asociadas a los flujos de agua y la formación de la estructura del suelo, ambas de gran beneficio para la reposición de condiciones físicas como la capacidad de retención y movilización de agua y las condiciones nutricionales requeridas para el desarrollo óptimo de la vegetación. Sin embargo, no todas las condiciones muestran una mejoría, pues la tasa de acumulación de la materia orgánica parece ser muy lenta por la naturaleza lábil del material agregado (gallinazo). En este sentido, la inclusión de pargana, o cascarilla de arroz, de naturaleza menos lábil, podría ser muy importante en la tasa de acumulación de materia orgánica.

Aunque en el plazo evaluado en este trabajo (tiempo de retoma de los suelos degradados de aproximadamente 5 años), no se recupere por completo la estructura original de los suelos de páramo natural, el ensayo de fertilidad muestra una mayor producción agrícola de estos suelos, incluso con valores de biomasa mayores a los logrados sobre suelos de páramo natural y suelos con agricultura intensiva. Esto podría ser consecuencia del rejuvenecimiento que están viviendo estos suelos que se están formando a partir del material parental, pues la degradación ha causado la decapitación de estas laderas. Sin embargo, algunas funciones del suelo de páramo se han perdido y parecen no recuperarse, como su capacidad de almacenamiento de carbono.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Abadín, J., González-Prieto, S.J., Sarmiento, L., Villar, M.C. y T. Carballas. 2002. Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biology & Biochemistry*. 34: 1739–1748.
- Abreu, Z., Llambí, L.D., y L. Sarmiento. 2009. Sensitivity of soil restoration indicators during paramo succession in the High Tropical Andes: chronosequence and permanent plot approaches. *Restoration Ecology*. 17 (5): 619 -627.
- Amacher, M.C., O’neill, P.K. y C.H. Perry. 2007. Soil Vital Signs: A New Soil Quality Index (SQI) for Assessing Forest Soil Health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Pp 12.
- Anderson, M.J. 2005. PERMANOVA: a FORTRAN computer program for permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland, New Zealand.
- Anderson, M.J., Gorley, R.N y K.R. Clarke. 2008. Permanova+ for Primer: Guide to Software and Statistical Methods. Massey University. Institute of Information & Mathematical Sciences. New Zealand.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L. y J.P. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 90: 25–45.
- Arshad, M.A. y S. Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 88: 153–160.
- Bautista-Cruz, A., Etchevers-Barra, J., del Castillo, R.F. y C. Gutierrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): 90-97.
- Brady, N. y R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. Twelfth Edition. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, USA. Pp. 881.
- Bending, G.D., Turnera, M.K., Rayns, F., Marx, M.C. y M. Wood. 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biology & Biochemistry*. 36: 1785–1792.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B. y J. Deckers. 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of histic andosols in south Ecuador. *Hydrological processes*. 19: 3985–3997.
- Cantú, MP. Becker, A. Bedano, JC. y HF. Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ci. Suelo (Argentina)*. 25 (2): 173-178.
- Carnevalli, A. 1944. Aspectos económicos y sociales del cultivo de trigo en los Andes. Organización de bienestar estudiantil, Universidad de Los Andes, Mérida. Pp 36.

- Cartes, MR. y EG, Gregorich. 2006. Soil sampling and methods of analysis. Second Edition. Canadian Society of Soil Science. Tylor & Francis Group, LLC. Canadá. Pp 198.
- Chapin, SF. Mooney, HA. y PA. Matson. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer – Verlag New York, Inc. Pp 398.
- Chia-Hsing, L., Mao-Yi, W., Victor-B, A. y Ch. Zueng-Sang. 2006. Using a soil quality index to assess the effects of applying swine manure compost on soil quality under a crop rotation system in Taiwan. Soil Science. 171 (3): 210-222.
- Coello, C., De Bièvre¹, B., Pacheco, E. y P. Cisneros. Análisis de métodos de estimación de la conductividad hidráulica saturada en suelos degradados. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Pp 19.
- Diack, M. y D.E. Scott, 2001. development of a soil quality index for the chalmers silty clay loam from the midwest USA. The Global Farm. Pp. 550-555.
- Diz-Cid, N. 2003. Respuesta Microbiana a la Quema y al Abonado del Suelo. Tesis de doctorado. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Universidad de Santiago de Compostela. Galicia, España.
- Estupiñán, L.H., Gómez, J.E. y V.J. Barrantes. 2009. Effect caused by agricultural activities on soil characteristics in the paramo El Granizo (Cundinamarca -Colombia). U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 12 (2): 79-89.
- Felicien, A. 2008. Un enfoque experimental y de modelización hacia la optimización de la fertilización nitrogenada en tres suelos andinos. Trabajo de Grado de Maestría. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Postgrado de Ecología Tropical. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Fuentes, F. y A. Massol-Deyá. 2002. Enumeración Bacteriana: el Número más Probable. Pp 60-78 En: Fuentes, F. y A. Massol-Deyá (Eds). Manual de Laboratorio. Ecología de Microorganismos. Universidad de Puerto Rico.
- García, E. 2010. Efecto de la Conversión de sistemas naturales en agroecosistemas sobre las comunidades microbianas del suelo en los andes venezolanos. Tesis de Doctorado. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Postgrado de Ecología Tropical, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Glover, JD. Reganold, JP. y PK. Andrews. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. Agriculture, Ecosystems & Environment. 80: 29-45.
- Gómez, M., Krüger, H. y M. Sargardoy. 1996. Actividad biológica en un suelo de la zona semiárida bonaerense cultivado con la secuencia soja-trigo bajo tres prácticas culturales. Ciencia del Suelo. 34: 37-41.
- Gonzales, S. 2004. Microbiota edáfica de los andes tropicales. Tesis de Doctorado. Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España.

- Guitian, F. y T. Carballas. 1976. Técnicas de Análisis de Suelos. Editorial Pico Sacro. Santiago de Compostela, España. Pp 287.
- Islam, K.R. y R.R., Weil. 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 79: 9-16.
- Karlen, D L. Wollenhaupt, N C. Erbach, D C y E.C. Berry. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10- years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*. Vol 31. Pp. 149-167.
- Labrador, J. 2008. Manual técnico de manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. Sociedad Española de Agricultura Ecológica (SEAE). Pp 47.
- Llambí, L.D., y L. Sarmiento. 1997. Dinámica de la fertilidad en parcelas agrícolas en descanso en el Páramo de Gavidia: biomasa microbiana y ciclaje de N. *Memorias del Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo*. CD-ROM. No. DL FR 2529710.
- Llambí, L.D., y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotropicos*. 11 (1): 1-14.
- Machado, D. 2005. Un enfoque agro -ecosistémico para el manejo eficiente del suministro de nitrógeno en el cultivo de papa en los Andes venezolanos. Tesis de Doctorado. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Postgrado de Ecología Tropical. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Malagón, D. 1982. Evolución de suelos en el páramo andino. Publicaciones del CIDIAT. Edo. Mérida, Venezuela.
- Manual Lab. Ecología Vegetal. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Manual Lab. Pedología. Escuela de Geografía. Facultad de Ingeniería Forestal. ULA. Mérida, Venezuela.
- Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E., y S. Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*. 6 (4): 701-711.
- Martínez-Salgado, MM., Gutierrez-Romero, V. Jannsens, M. y R. Ortega-Blu. 2010. Biological soil quality indicators: a review. *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology*. 1: 319-328.
- Mrkonjic, FM. Engel, M. Hagn, A. Munch, JC. Sommer, M. y M. Schlöter. 2009. Changes of diversity pattern of proteolytic bacteria over time and space in an agricultural soil. *Microbial Ecology* 57(3): 391-401.
- Monasterio, M. 1980. Poblamiento humano y uso de la tierra en los altos Andes de Venezuela. En: Monasterio, M. (Ed). *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Editorial de la Universidad de Los Andes, Mérida. Pp 170-198.
- Monasterio, M. y J. Celecia. 1991. El Norte de los Andes Tropicales. *Sistemas Naturales y Agrarios en la Cordillera de Mérida*. El hombre y la biósfera. UNESCO. INA.

- Nielsen, MN. y A. Winding. 2002. Microorganisms as indicators of soil health. NERI technical report, N°388. Department of microbial ecology and biotechnology. Denmark: National Environmental Research Institute
- Pansu, M. y J. Gautheyrou. 2006. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Springer. Montpellier, France. Pp 995
- Rodríguez, N., Florentino, A., Torres, D., Yendis, H. y F. Zamora. 2009. Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro, estado Falcón. Rev Fac Agron (LUZ). 26: 340 -361.
- Rodríguez, M. 2010. El paramo como proveedor de agua: análisis de las unidades geomorfológicas y de vegetación sobre el balance hídrico de una microcuenca andina de Venezuela. Trabajo de Grado de Maestría. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Postgrado de Ecología Tropical. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Sarmiento, G. 1986. Ecologically crucial features of climate in high tropical mountains. En: Vuilleumier, F., Monasterio, M. (Eds): High Altitude Tropical Biogeography, Oxford University Press, Oxford, Pp. 11-45.
- Sarmiento, L. Acea, M.J., Barrios, E., Bowen, W., Herrera, R., Llambí, L.D., Ortuño, N., Sivila, R., y A. Valera. 2001. Un marco conceptual y metodológico para estudios de fertilidad del suelo en los andes tropicales. IV simposio internacional de desarrollo sustentable en los Andes.
- Sarmiento, L y P. Bottner. 2002. Carbon and Nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. Applied Soil Ecology. 19: 79 -89.
- Sarmiento, L. y L.D. Llambí. 2011. Regeneración del páramo después de un disturbio agrícola: síntesis de dos décadas de investigaciones en sistemas con descansos largos de la Cordillera de Mérida. En: Herrera, F. y I., Herrera. (Eds). La restauración ecológica en Venezuela: fundamentos y experiencias. Ediciones IVIC. Caracas, Venezuela. Pp 123-145.
- Sarmiento, L. y M. Monasterio. 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los Andes venezolanos (páramo de Gavidia). En: Rabey, M. (Ed). El Uso Tradicional de los Recursos Naturales en Montañas: Tradición y Transformación. UNESCO - ORCYT. Montevideo. Pp 55-77.
- Sarmiento, L. y J.K. Smith. 2011. Degradación de laderas durante el ciclo triguero en los andes venezolanos y factores que limitan su restauración. En Herrera, F. y I., Herrera. (Eds). La restauración ecológica en Venezuela: fundamentos y experiencias. Ediciones IVIC. Caracas, Venezuela. Pp 17-34.
- Sarmiento, L., Smith, JK., Márquez, N., Escalona, A., Erazo; C. En prensa. Constraints for the restoration of tropical alpine vegetation in degraded slopes of the Venezuelan Andes. Plant ecology and biodiversity
- Schipper, LA. y GP. Sparling. 2000. Performance of Soil Condition Indicators Across Taxonomic Groups and Land Uses. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 300–311.

- Schulte, E.E. 1995. Recommended Soil Organic Matter Tests. Pp. 47-56. En: Thomas Sims, J. y A. Wolf (Eds.) Recommended soil testing procedures for the northeastern United States. Northeast Regional Bulletin #493. Agricultural Experiment Station, University of Delaware, Newark, DE. Tomado de: http://www.aasl.psu.edu/soil_methods.htm
- Sokal, R.R. y F.J. Rohlf. 1986. Introducción a la bioestadística. Serie de biología fundamental. Editorial Reverté, S.A. Sevilla, España. Pp 380.
- Sojka, E.R., Upchurch, D.R. y N.E. Borlaug. 2003. Quality soil management or soil quality management: performance versus semantics. *Advances in Agronomy*. 79: 1-68.
- Stelzer, V. 1992. Los Efectos del Cultivo Intensivo de Hortalizas sobre la Fertilidad de los Suelos en el Valle Superior del Chama. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Geografía, ULA. Mérida, Venezuela.
- Toro, J. 2008. Efecto del Suministro de Gallinazo sobre el Proceso de Nitrificación en Suelos Agrícolas de los Páramos de Mérida. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias, ULA: Mérida, Venezuela.
- Wooster, P.L. 1994. Chapter 5: Most probable number counts. Pp 59-79. En: Weaver, R.W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdick, D., Smith, S., Tabatabai, A. y A. Wollum (Eds). *Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and biochemical properties*. USA. Pp 1097.
- Zuo, X., Zhao, H., Zhao, X., Guo, Y., Yun, J., Wang, S. y T. Miyasaka. 2009. Vegetation pattern variation, soil degradation and their relationship along a grassland desertification gradient in Horqin Sandy Land, northern China. *Environmental Geology*. 58:1227-1237.