



Universidad Santiago de Compostela
Facultad de Biología
Departamento de Edafología y Química Agrícola

Contenido, formas y mecanismos de estabilidad del carbono orgánico en suelos del departamento del Magdalena (Colombia), bajo diferentes tipos de usos del suelo

José Rafael Vásquez Polo

Santiago de Compostela

Mayo de 2014



Directores

Dr. Felipe Macías Vázquez

Catedrático del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela.

Dr. Alvaro García Ocampo

Presidente de la Comisión de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas de la Unión Internacional de Sociedades de la Ciencia del Suelo.

Doctorando:

José Rafael Vázquez Polo

I.A., MSc.



Firma



DEDICATORIA

A mis Padres, Rafael Vásquez De la Hoz y Fanny Beatriz Polo Yanci;
A mi esposa, Iromaldis Brugés. A mis Hijos, Rosa Elena, José Carlos y Laura Carolina;
A mis Hermanos, Fabián y María José. A mi sobrino Juan José
y a toda mi familia,
Por su infinito amor y su apoyo irrestricto en todas las circunstancias de mi vida.



AGRADECIMIENTOS

A los Directivos de la Universidad del Magdalena; Dr. Ruthber Escorcía Caballero, Rector; los Vicerrectores Ing. Pablo Vera Salazar, Ing. Pedro Eslava Eljaiek, Lic. José Henry Escobar Acosta y al Ing. Jaime Noguera Serrano.

A la Fundación Carolina, especialmente al coordinador del programa de becas de doctorado 2009, Juan Torres y a Lucía Polanía en la Fundación Carolina Colombia.

A los Doctores Felipe Macías Vázquez y Álvaro García Ocampo, por su permanente apoyo en la dirección del presente trabajo.

A todo el personal administrativo y docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Magdalena, a mis compañeros Juan Carlos De la Rosa, Nelson, Liliana, Irma, Héctor, Pedro, Inés, Kira, Paula, Alberto P y Alberto M, quienes siempre estuvieron pendientes en esta etapa de mi vida y en especial al profesor Eduino Carbonó por su aporte en la identificación taxonómica de las especies vegetales de los bosques muestreados.

A todos los profesores del Máster en Medio Ambiente y Recursos Naturales, especialmente a los del departamento de edafología y química agrícola: Rosa Calvo, José Luis Otero, Eduardo Martínez Cortizas, Eduardo García Rodejas, Xavi Pontevedra y Juan Antelo.

A los Docentes de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, en especial a los Doctores Juan Carlos Menjivar Flores y Diosdado Baena por su asesoría en diferentes temas de la tesis.

A mis compañeros durante los últimos cinco años: Ramón, Maca, Adriana, Darío, Manuel, Rebeca, Joeri, Judith, Paula, María, Luis Felipe y Marta.

Al personal técnico del laboratorio de Edafología de la Universidad de Santiago de Compostela: David, Carmen, Paco y María.

Con toda mi gratitud...

José Rafael Vásquez Polo





Facultad de Biología
Departamento de Edafología y Química Agrícola
Campus Universitario Sur 15706
Santiago de Compostela

Dr. Felipe Macías Vázquez, Catedrático del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela

INFORMA:

Que el presente trabajo titulado “*Contenido, Formas y Mecanismos de Estabilidad del Carbono Orgánico en Suelos del Departamento del Magdalena (Colombia), Bajo Diferentes Tipos de Usos del Suelo*”, realizado por el doctorando *José Rafael Vásquez Polo*, para optar al grado de Doctor, reúne todos los requisitos y condiciones exigidas para ser presentado como Tesis Doctoral.

Y para que así conste, expido el presente certificado en Santiago de Compostela, Mayo de 2014.

Fdo. Dr. Felipe Macías Vázquez





Facultad de Biología
Departamento de Edafología y Química Agrícola
Campus Universitario Sur 15706
Santiago de Compostela

Dr. Álvaro García Ocampo Presidente Comisión de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas de la Unión Internacional de Sociedades de la Ciencia del Suelo

INFORMA:

Que el presente trabajo titulado *“Contenido, Formas y Mecanismos de Estabilidad del Carbono Orgánico en Suelos del Departamento del Magdalena (Colombia), Bajo Diferentes Tipos de Usos del Suelo”*, realizado por el doctorando *José Rafael Vásquez Polo*, para optar al grado de Doctor, reúne todos los requisitos y condiciones exigidas para ser presentado como Tesis Doctoral.

Y para que así conste, expido el presente certificado en Palmira (Valle del Cauca-Colombia), Mayo de 2014.

Fdo. Dr. Alvaro García Ocampo



TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS _____	16
LISTA DE TABLAS _____	18
LISTA DE ANEXOS _____	21
RESUMEN GENERAL _____	23

CAPÍTULO 1 UNA VISIÓN GENERAL A LOS SUELOS DE COLOMBIA Y SUS PRINCIPALES USOS, CON ÉNFASIS EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA _____ 35

1. Generalidades. _____	35
2. Distribución y uso del suelo. _____	45
3. El Carbono Orgánico en los suelos _____	49
4. Factores de formación de los suelos del departamento del Magdalena _____	51
4.1. Geología _____	53
4.2. Geomorfología _____	57
4.3. Paisajes y tipos de relieves _____	58
4.4. Clima _____	68
4.5. Vegetación _____	80
4.5.1. Vegetación natural _____	80
4.5.2. Formaciones vegetales _____	82
5. Bibliografía _____	91

CAPÍTULO 2 JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA _____ 103

1. Justificación _____	103
2. Objetivos _____	106
3. Metodología _____	107
3.1.1. Zona 1 _____	109
3.1.2. Zona 2 _____	112
3.1.3. Zona 3 _____	116
3.1.4. Zona 4 _____	119
3.1.5. Zona 5 _____	122
3.1.6. Zona 6 _____	125
4. Bibliografía _____	129

CAPÍTULO 3 VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS _____ 133

Resumen _____	133
---------------	-----

1.	Introducción	134
2.	Materiales y Métodos	137
2.1.	Muestreo	137
2.2.	Métodos Analíticos	137
2.2.3.	Análisis físicos	137
2.2.4.	Análisis mineralógico	137
2.2.5.	Análisis químicos	138
2.2.6.	Extracciones selectivas de Al, Fe	139
2.2.7.	Disolución de equilibrio y modelización termodinámica	139
2.3.	Análisis de la información:	139
3.	Resultados y Discusión	140
3.1.	Análisis de la variabilidad con un enfoque univariado	140
3.2.	Análisis multivariado	144
3.2.1.	Análisis factorial por componentes principales	145
3.2.2.	Análisis discriminante	147
3.3.	Disolución selectiva de Hierro y Aluminio.	151
3.4.	Análisis mineralógico de las fracciones arena y arcilla.	155
3.5.	Análisis de la disolución de equilibrio.	158
4.	Conclusiones	174
5.	Bibliografía	181

CAPÍTULO 4 EFECTOS DEL USO DE LOS SUELOS SOBRE LAS FORMAS Y CONTENIDOS

DE CARBONO	187	
Resumen	187	
1.	Introducción	187
2.	Materiales y Métodos	196
2.1.	Muestreo de suelos	196
2.2.	Métodos Analíticos	196
3.	Resultados y discusión	197
3.1.	Características físicas y químicas de los suelos estudiados	197
3.2.	Análisis de las formas y contenidos de Carbono	198
3.3.	Acumulación de Carbono.	207
3.4.	Análisis de componentes principales.	210
3.5.	Análisis discriminante.	212
4.	Conclusiones	215
5.	Bibliografía	217

CAPÍTULO 5 RESPIRACIÓN DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS FORMAS DE CARBONO	225
Resumen	225
Abstract	225
1. Introducción	226
2. Materiales y Métodos	227
3. Resultados y discusión	229
4. Conclusiones y recomendaciones	235
5. Bibliografía	236
CAPÍTULO 6 COMPOSICIÓN MOLECULAR DE LA MATERIA ORGÁNICA EXTRAÍBLE CON NaOH: UN ESTUDIO CON PIRÓLISIS (P-CG/EM)	241
Resumen	241
1. Introducción	241
2. Materiales y Métodos	244
2.1. Descripción de los sitios de muestreo	244
2.2. Análisis estadístico	247
3. Resultados y Discusión	248
3.1. Compuestos Identificados	248
3.2. Análisis factorial.	257
4. Conclusiones	260
5. Bibliografía	261
CONCLUSIONES FINALES	265

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Ubicación Geográfica de Colombia. Fuente	36
Figura 2. Distribución generalizada de los grupos de rocas y de sedimentos no consolidados en Colombia.....	37
Figura 3. Mapa físico-político de Colombia.	41
Figura 4. Regiones Naturales de Colombia.	43
Figura 5. Distribución de los suelos de Colombia, agrupados por orden taxonómico.	44
Figura 6. Localización geográfica del departamento del Magdalena en Colombia. Fuente: IGAC (2009).	53
Figura 7. Provincias Geotectónicas del Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta, (1) Provincia Geotectónica de la Sierra Nevada (2) Provincia Geotectónica de Sevilla y 3) Provincia Geotectónica de Santa Marta.	55
Figura 8. Mapa físico del departamento Del Magdalena.	60
Figura 9. Modelo digital de elevación del departamento del Magdalena, en donde se observan las dos geoestructuras: Cordillera y Megacuena de sedimentación.	61
Figura 10. Zonificación Climática del departamento del Magdalena.	73
Figura 11. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Arido.....	74
Figura 12. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Semi árido..	75
Figura 13. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Muy Seco	76
Figura 14. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido muy húmedo.	78
Figura 15. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido seco.....	79
Figura 16. Vegetación natural, típica de las áreas secas.	81
Figura 17. Vegetación de pantanos en el departamento del Magdalena.	82
Figura 18. Vegetación de la formación monte espinoso tropical al norte de Santa Marta.....	83
Figura 19. Vegetación de la formación bosque seco tropical.	85
Figura 20. Vegetación de la formación bosque muy húmedo.	87

CAPÍTULO 2

Figura 1. Ubicación de las zonas de muestreo.	108
Figura 2. Sitios de Muestreo Zona 1. (a) Cultivo (Café), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo.....	111
Figura 3. Sitio de muestreo Zona 2. (a) Cutivo (Palma Africana), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo..	115

Figura 4. Sitio de muestreo Zona 3. (a) Suelo Arado, (b) Bosque y (c) Perfil del suelo.	118
Figura 5. Sitio de muestreo Zona 4. (a) Cutivo banano (b) Cutivo mango, (c) Bosque y (d) Perfil del suelo.	121
Figura 6. Sitio de muestreo Zona 5. (a) Cutivo (frutales), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo.	124
Figura 7. Sitio de muestreo Zona 6. (a) Cutivo (hortalizas), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo	127

CAPÍTULO 3

Figura 1. Comportamiento del CP 1 en las diferentes zonas.	146
Figura 2. Comportamiento del CP 2 en las diferentes zonas.	147
Figura 3. Comportamiento del CP 3 en las diferentes zonas.	147
Figura 4. Diagrama Eh-pH (diagrama de Pourvaix) con la situación de las disoluciones de equilibrio de los suelos del Magdalena.	160
Figura 5. Las condiciones de la disolución de los suelos estudiados conducen a la formación de ferrihidrita y, su rápida evolución hacia la goethita o la hematita. en todos los casos.	161
Figura 6. Diagrama de equilibrio del sistema SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -H ₂ O con las ecuaciones correspondientes a minerales de alto y bajo grado de orden.	168
Figura 7. Las disoluciones están sobresaturadas en prácticamente todos los minerales del sistema y controladas por una forma de Al hidroxilada de bajo grado de orden.	169

CAPÍTULO 4

Figura 1. Compartimentos de Carbono (Contenido total 50400 Pg. C).	188
Figura 2. Almacenamiento de Ct por usos del suelo en las diferentes zonas.	207
Figura 3. Correlaciones de las variables fisicoquímicas del suelo con los componentes 1 y 2.	211

CAPÍTULO 6

Figura 1. Proporción relativa de compuestos alifáticos por zonas.	251
Figura 2. Proporción relativa de compuestos alifáticos por zonas.	252
Figura 3. Proporción relativa de compuestos poliaromáticos por zonas.	252
Figura 4. Proporción relativa de compuestos tipo ligninas por zonas.	254
Figura 5. Proporción relativa de compuestos fenólicos por zonas.	255
Figura 6. Proporción relativa de compuestos nitrogenados por zonas.	256
Figura 7. Proporción relativa de compuestos polisacáridos por zonas.	257
Figura 8. Análisis factorial de los productos de pirólisis.	258

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. Distribución de la vocación de uso de las tierras en Colombia, 2002 (miles de ha).	45
Tabla 2. Distribución porcentual del uso actual de las tierras en Colombia y Magdalena.	45
Tabla 3. Carbono Orgánico en suelos de Colombia según el clima.	50
Tabla 4. Carbono Orgánico en Suelos de La Región Caribe.	51
Tabla 5. Unidades de paisaje y tipos de relieve del departamento del Magdalena	62
Tabla 6. Datos y zonificación climática departamento del Magdalena	70
Tabla 7. Clima ambiental – según IGAC.	72
Tabla 9. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Semi árido.	74
Tabla 10. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática Cálido Muy Seco.	76
Tabla 11. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática Cálido Muy húmedo.	77
Tabla 12. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido seco.	79
Tabla 14. Especies indicadoras del Monte espinoso tropical (me - T)	84
Tabla 15. Especies indicadoras del Bosque seco tropical (bs - T).....	84
Tabla 16. Especies indicadoras del Bosque muy seco tropical (bms - T).....	86
Tabla 17. Especies indicadoras del Bosque muy húmedo sub-tropical (bmh - ST)	86
Tabla 18. Especies indicadoras del Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB)	87
Tabla 19. Especies indicadoras del bosque muy húmedo montano (bmh-M).....	88
Tabla 20. Especies indicadoras del bosque pluvial montano (bp-M)	89
Tabla 21. Especies indicadoras del Páramo pluvial subalpino (pp-SA).....	89
Tabla 22. Especies indicadoras de la Tundra pluvial alpina (tp-A).....	89

CAPÍTULO 2

Tabla 1. Especies vegetales características en el bosque de la zona 1.	110
Tabla 2. Propiedades físico-químicas de los suelos en la zona 1.....	112
Tabla 3. Especies vegetales características en el bosque de la zona 2.	114
Tabla 4. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 2.....	114
Tabla 5. Especies vegetales características en el bosque de la zona 3.	117
Tabla 6. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 3.....	118
Tabla 7. Especies vegetales características en el bosque de la zona 4.	120
Tabla 8. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 4.....	122
Tabla 9. Especies vegetales características en el bosque de la zona 5.	123
Tabla 10. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 5.....	125
Tabla 11. Especies vegetales características en el bosque de la zona 6.	126

Tabla 12. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 6.....	128
---	-----

CAPÍTULO 3

Tabla 1. Muestras utilizadas en los análisis de mineralogía y disolución de equilibrio.	138
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos.	143
Tabla 3. Resultados ANOVA multivariado.....	144
Tabla 4. Valores propios para los componentes principales.....	145
Tabla 5. Matriz de correlación entre propiedades y componentes principales.	146
Tabla 6. Prueba de igualdad de la media de los grupos.	148
Tabla 7. Autovalores.	148
Tabla 8. Lambda de Wilks	149
Tabla 9. Coeficientes estandarizados.....	149
Tabla 10. Centroides.	150
Tabla 11. Matriz de estructura.....	150
Tabla 12. Extracción selectiva de Fe y Al en g kg ⁻¹	151
Tabla 13. Relaciones molares entre Fe y Al.....	153
Tabla 14. Composición semicuantitativa de minerales en la fracción arena fina (% en peso).	155
Tabla 15. Datos analíticos de la disolución de equilibrio en mg L ⁻¹	156
Tabla 16. Datos analíticos de la disolución de equilibrio en mg L ⁻¹	158
Tabla 17. Especies de mayor actividad en las aguas pésimas del complejo de ENUSA.	162
Tabla 18. Índices de saturación mineral en las disoluciones de los suelos del Magdalena.	171

CAPÍTULO 4

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos	199
Tabla 2. Valores medios para las formas de Carbono en las diferentes zonas.	202
Tabla 3. Características edafoclimáticas de las zonas.....	204
Tabla 4. Formas de Carbono en suelos de bosques.....	204
Tabla 5. Formas de Carbono en suelos de cultivo.	205
Tabla 6. Relaciones entre contenidos y las diferentes formas de Carbono	206
Tabla 7. Acumulación de C en los primeros 20c m de profundidad en t C ha ⁻¹	209
Tabla 8. Pérdidas de C en las diferentes zonas.	210
Tabla 9. Porcentajes de pérdidas y ganancias de las diferentes formas de C.	210
Tabla 10. Prueba de igualdad de la media de los grupos.....	212
Tabla 11. Autovalores.	212
Tabla 12. Lambda de Wilks.....	213

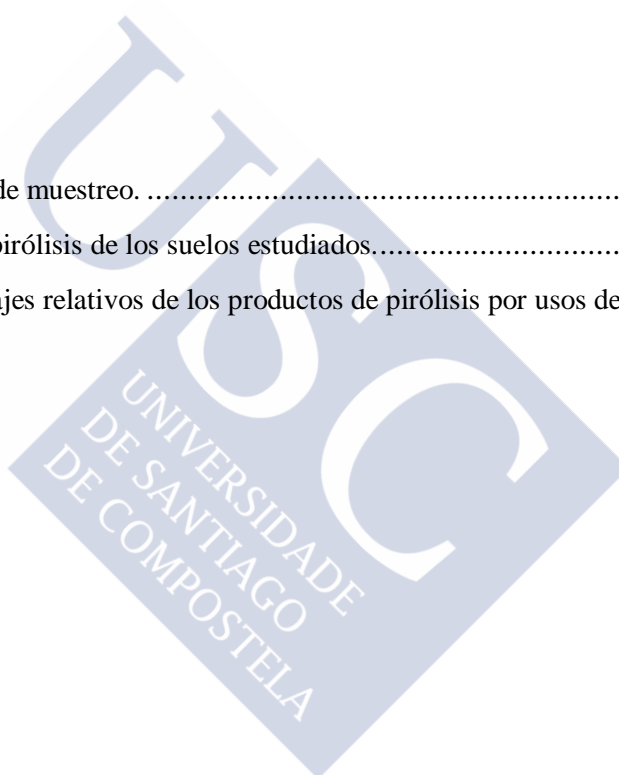
Tabla 13. Centroides	213
Tabla 14. Coeficientes estandarizados	213

CAPÍTULO 5

Tabla 1. Valores medios por zonas de algunas propiedades químicas.....	229
Tabla 2. Propiedades relacionadas con las formas de Carbono.....	230
Tabla 3. Prueba de Tukey para respiración por zonas.	231
Tabla 4. Prueba de contraste simple para usos del suelo.....	232
Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson de la respiración del suelo con algunas propiedades químicas.	233

CAPÍTULO 6

Tabla 1. Descripción de las zonas de muestreo.	245
Tabla 2. Principales productos de pirólisis de los suelos estudiados.....	249
Tabla 3. Promedios de los porcentajes relativos de los productos de pirólisis por usos del suelo.	251



LISTA DE ANEXOS

CAPÍTULO 3

Anexo 1. Pruebas de Tukey para diferentes propiedades.....	176
Anexo 2. Parámetros estadísticos para las formas de Fe y Al.....	178
Anexo 3. Relaciones Molares entre las diferentes formas de Fe y Al.....	178
Anexo 4. Correlaciones bivariadas de Pearson.....	179
Anexo 5. Parámetros estadísticos asociados a las propiedades del suelo.....	180

CAPÍTULO 4

Anexo 1. Correlaciones bivariadas de Pearson.....	216
Anexo 2. Anova multivariado	216





RESUMEN GENERAL

El objetivo general del presente estudio fue: Innovar en el estudio de la materia orgánica del suelo, caracterizando las diferentes formas y mecanismos de estabilización del Carbono en suelos con diferentes usos al norte del departamento del Magdalena (Colombia). Para este fin se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a) Describir la caracterización edafoclimática de las zonas objeto del estudio, para establecer las relaciones Clima - C del suelo.
- b) Caracterizar la variabilidad de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas de los suelos estudiados y su clasificación taxonómica en los sistemas Keys to Soil Taxonomy (2010) y WRB (2006).
- c) Determinar las diferentes formas de Carbono: Carbono total (Ct), Carbono oxidable (Cox), Carbono hidrolizable (Ch), Carbono extraíble con pirofosfato sódico (Cp), Carbono no oxidable (Cnox) y cuantificar el efecto causado por el cambio de uso del suelo sobre los contenidos, distribución y formas de Carbono.
- d) Incrementar el conocimiento asociado con la respiración del suelo y su relación con las formas de Carbono estudiadas.
- e) Avanzar en estudios cualitativos de la materia orgánica de los suelos estudiados mediante métodos de fraccionamiento pirolítico.

El cuerpo del presente trabajo está dividido en 6 capítulos, un primer capítulo introductorio donde se hace una revisión general a los suelos de Colombia con atención especial a los usos de los suelos en el departamento del Magdalena; en los capítulos restantes se desarrollan los objetivos específicos planteados. A continuación se presentan los resúmenes de cada capítulo:

Capítulo 2. Caracterización edafoclimática de las zonas muestreadas en el departamento del Magdalena

La investigación se realizó al nor-orienté del departamento del Magdalena (Colombia); entre las coordenadas 11°36'58"-8°56'25" N, 73°32'50"-74°56'45"W; en los municipios de: Santa Marta, Ciénaga (estribaciones de la sierra nevada), Zona Bananera, Dibulla y Aracataca, considerados a partir de estudios previos IGAC (2009), como los de mayor

tradición y vocación agrícola, con la mayor área sembrada en cultivos de importancia económica del departamento.

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado, seleccionando seis zonas o estratos de muestreo, diferenciados por el tipo de uso del suelo y ubicadas en el clima cálido, entre 0 y 1000 msnm (condiciones edafoclimáticas donde se siembran los cultivos de mayor importancia económica en el departamento); en cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo; uno de cultivo y el otro en área de bosque; en cada sitio se tomaron cuatro muestras de suelo entre 0-20 cm de profundidad, compuestas por 10 submuestras tomadas aleatoriamente en el campo (ICA, 1992; Brady y Weil, 1999), para un total de 52 muestras a las que posteriormente se les realizaron las determinaciones físicas, químicas y biológicas; el tamaño de muestras para los análisis de mineralogía, disolución de equilibrio y pirolisis se redujo a 13, tomando sólo una muestra por uso en cada zona.

La descripción de cada zona se llevo a cabo teniendo en cuenta el paisaje, clima ambiental, tipo de relieve, clasificación de los suelos según USDA (2010) y WRB (2006), descritos en el estudio de suelos y clasificación de tierras del departamento de Magdalena (IGAC, 2009).

Zona1: localizada a 10°53'52.27"N y 74°05'09"O en la Vereda Kennedy, municipio de Ciénaga; **Uso del suelo:** cultivo café (*Coffea Arabica*) y bosque Húmedo Tropical con las siguientes **especies vegetales:** *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Cordia spinescens* L., *Trema micrantha* (L.) Blume, *Clusia multiflora* Kunth, *Croton bogotanus* Cuatrec., *Heliconia bihai* (L.) L., *Vismia baccifera* (L.) Planch. & Triana, *Aiouea costaricensis* (Mez) Kosterm., *Persea caerulea* (Ruiz & Pav.) Mez, *Gustavia verticillata* Miers, *Acacia riparia* Kunth, *Inga sapindoides* Willd., *Mimosa albida* Willd., *Bunchosia argentea* (Jacq.) DC., *Heliocarpus popayanensis* Kunth, *Trichospermum galeottii* (Turcz.) Kosterm., *Meriania longifolia* (Naudin) Cogn., *Tibouchina longifolia* (Vahl) Baill., *Ficus tonduzii* Standl., *Poulsenia armata* (Miq.) Standl., *Hieronyma fendleri* Briq., *Piper aduncum* L., *Piper cernuum* Vell., *Lasiacis procerrima* (Hack.) Hitchc. ex Chase, *Cybianthus iteoides* (Benth.) G.Agostini, *Parathesis serrulata* (Sw.) Mez, *Urera caracasana* (Jacq.) Gaudich. ex Griseb.; **Altitud:** 956 msnm. **Clima:** Cálido húmedo, temperatura media anual de 24°C y precipitación media de 2000 mm; **Paisaje:** montaña; **Litología:** rocas metamórficas (neis y esquistos) y rocas ígneas (cuarzodioritas, granodioritas, cuarzomonzonitas); **Clasificación:** Typic Eutrudepts (IGAC

2009, Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol háplico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico.

Zona 2: localizada a 10°32'00"N y 74°10'09"W en el Municipio de Aracataca.; **Uso del Suelo:** Cultivo de Palma africana y Bosque seco tropical con las siguientes **especies vegetales:** *Adenocalymma inundatum* Mart. ex DC., *Bignonia aequinoctialis* L., *Handroanthus billbergii* (Bureau & K.Schum.) S.O.Grose, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC., *Ipomoea triloba* L., *Acacia polyphylla* DC., *Acacia riparia* Kunth, *Acacia tortuosa* (L.) Willd., *Albizia saman* (Jacq.) Merr., *Bauhinia glabra* Jacq., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Piptadenia flava* (DC.) Benth., *Senna obtusifolia* (L.) H.S.Irwin & Barneby, *Senna occidentalis* (L.) Link, *Zapoteca formosa* (Kunth) H.M.Hern., *Stigmaphyllon dichotomum* (L.) Griseb., *Tetrapterys discolor* (G.Mey.) DC., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Melochia parvifolia* Kunth, *Panicum maximum* Jacq., *Paspalum virgatum* L., *Chomelia spinosa* Jacq., *Coutarea hexandra* (Jacq.) K.Schum., *Hamelia patens* Jacq., *Lantana camara* L.; **Altitud:** 42 msnm; **Clima:** Cálido seco, temperatura media anual de 28.4°C y precipitación media año de 1200 mm; **Paisaje:** Planicie; **Litología:** sedimentos aluviales; **Clasificación:** Typic Ustifluvents, (IGAC 2009, Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Fluvisol háplico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico.

Zona 3: localizada a 11°16'41.2"N y 73°11'01"W en el Corregimiento las flores, Municipio de Dibulla.; **Uso del Suelo:** cultivado con banano orgánico y Bosque seco cuyas **especies vegetales** son: *Sterculia apetala* (Jacq.) H.Karst., *Spondias mombin* L., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Acacia tortuosa* (L.) Willd., *Bauhinia guianensis* var. *splendens* (Kunth) Amshoff, *Crateva tapia* L., *Pradosia colombiana* (Standl.) T.D.Penn. ex T.J.Ayers & Boufford, *Vitex cymosa* Bertero ex Spreng., *Ficus tonduzii* Standl., *Sapium glandulosum* (L.) Morong, *Maclura tinctoria* (L.) D.Don ex Steud., *Anacardium excelsum* (Bertero ex Kunth) Skeels, *Attalea butyracea* (Mutis ex L.f.) Wess.Boer, *Aspidosperma desmanthum* Benth. ex Müll.Arg., *Nectandra turbacensis* (Kunth) Nees, *Sabal mauritiiformis* (H.Karst.) Griseb. & H.Wendl., *Aiouea costaricensis* (Mez) Kosterm., *Luehea seemannii* Triana & Planch, *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Mascagnia macradena* (DC.) Nied., *Gouania polygama* (Jacq.) Urb., *Cecropia peltata* L., *Ficus insipida* Willd.; **Altitud:** 5 msnm. **Clima:** Cálido seco, temperatura media anual de 27°C y precipitación media de 1245 mm; **Paisaje:** Planicie; **Litología:** Depósitos superficiales clásticos, hidrogénicos mixtos;

Clasificación: Fluventic Haplustepts, (IGAC 2009, Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluventico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico.

Zona 4: localizada a 10°57'06''N y 74°12'48.19''W en el Sector la Aguja, municipio Zona Bananera,; **Uso del Suelo:** Cultivos de Banano (*Musa sp*), y Bosque seco tropical cuyas **especies vegetales** son: *Ruellia tuberosa* L., *Anacardium excelsum* (Bertero ex Kunth) Skeels, *Spondias mombin* L., *Wedelia symmetrica* Rusby, *Fridericia dichotoma* (Jacq.) L.G.Lohmann, *Cordia alba* (Jacq.) Roem. & Schult., *Heliotropium angiospermum* Murray, *Cleome spinosa* Jacq., *Cayaponia glandulosa* (Mart.) Cogn., *Melothria pendula* L., *Acalypha alopecuroides* Jacq., *Astraea lobata* (L.) Klotzsch, *Acacia polyphylla* DC., *Centrosema pubescens* Benth., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Senna obtusifolia* (L.) H.S.Irwin & Barneby, *Stigmaphyllon dichotomum* (L.) Griseb., *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., *Melochia parvifolia* Kunth, *Pseudabutylon umbellatum* (L.) Fryxell, *Sterculia apetala* (Jacq.) H.Karst., *Panicum maximum* Jacq., *Sapindus saponaria* L., *Lantana camara* L.; **Altitud:** 15 msnm. **Clima:** Cálido seco, temperatura media de 27°C y precipitación media de 750 mm; **Paisaje:** Planicie aluvial; **Litología:** sedimentos aluviales medios; **Clasificación:** Typic Haplustepts, (IGAC 2009, Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluvéntico endogleyico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico.

Zona 5: localizada a 11°11'-11°15N y 74°07'- 74°12'W en el centro experimental del Municipio de Santa Marta; **Uso del Suelo:** Cultivo de Frutales y Bosque seco tropical cuyas **especies vegetales** son: *Amaranthus dubius* Mart. ex Thell., *Astronium graveolens* Jacq., *Wedelia symmetrica* Rusby, *Bignonia pterocalyx* (Sprague ex Urb.) L.G.Lohmann, *Dolichandra unguis-cati* (L.) L.G.Lohmann, *Fridericia dichotoma* (Jacq.) L.G.Lohmann, *Fridericia pubescens* (L.) L.G.Lohmann, *Handroanthus billbergii* (Bureau & K.Schum.) S.O.Grose, *Bursera graveolens* (Kunth) Triana & Planch., *Cynophalla flexuosa* (L.) J.Presl, *Merremia umbellata* (L.) Hallier f., *Erythroxylum havanense* Jacq., *Croton fragilis* Kunth, *Machaerium biovulatum* Micheli, *Platymiscium pinnatum* (Jacq.) Dugand, *Senna obtusifolia* (L.) H.S.Irwin & Barneby, *Zapoteca formosa* (Kunth) H.M.Hern., *Stigmaphyllon dichotomum* (L.) Griseb., *Melochia parvifolia* Kunth, *Pisonia aculeata* L., *Paullinia macrophylla* Kunth, *Serjania mexicana* (L.) Willd.; **Altitud:** 10 msnm; **Clima:** Cálido muy seco, temperatura media de 30°C y una precipitación media de 880 mm.; **Paisaje:** Planicie Fluvio Marina; **Litología:** sedimentos fluviomarinos; **Clasificación:** Fluventic Haplustepts, (IGAC 2009,

Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluvéntico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico.

Zona 6: localizada a 74°07' y 74°12' W y 11° 11' y 11° 15' N en la granja experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta. **Uso del Suelo:** Cultivo de Hortalizas y Bosque muy seco tropical cuyas **especies vegetales** son: *Calotropis procera* (Aiton) Dryand., *Viguiera mucronata* S.F.Blake, *Dolichandra unguis-cati* (L.) L.G.Lohmann, *Fridericia dichotoma* (Jacq.) L.G.Lohmann, *Fridericia pubescens* (L.) L.G.Lohmann, *Cordia alba* (Jacq.) Roem. & Schult., *Crateva tapia* L., *Cynophalla flexuosa* (L.) J.Presl, *Ipomoea triloba* L., *Merremia aegyptia* (L.) Urb., *Lecythis minor* Jacq., *Acacia polyphylla* DC., *Acacia tortuosa* (L.) Willd., *Albizia niopoides* (Benth.) Burkart, *Machaerium milleflorum* Pittier, *Pithecellobium lanceolatum* (Willd.) Benth., *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., *Rhynchosia minima* (L.) DC., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Melochia caracasana* Jacq., *Melochia parvifolia* Kunth, *Boerhavia erecta* L.; **Altitud:** 7 msnm; **Clima:** Cálido muy seco, temperatura media de 28°C y una precipitación media de 663 mm; **Paisaje:** Planicie Fluvio Marina; **Litología:** sedimentos fluviomarinos; **Clasificación** Typic Ustipsamments (IGAC 2009, Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Arenosol háplico (WRB, 2006); **Régimen Climático:** ústico, Isohipertérmico (Vásquez y Baena, 2010).

Capítulo 3. Variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados

Para evaluar el efecto del cambio del uso en las propiedades físicas y químicas de los suelos al norte del departamento del Magdalena (Colombia), se seleccionaron seis zonas para el muestreo, entre 0 y 1000 msnm con el criterio de representar suelos de cultivos agrícolas de mayor importancia en la región y suelos de bosques aledaños a las áreas cultivadas; en cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo: cultivo y bosque, en cada sitio se tomaron cuatro muestras compuestas para un total de 52 muestras de suelos. Las propiedades evaluadas fueron: Físicas (Color, Textura y Densidad aparente) y Químicas (pH, CIC, N total, C total, C oxidable, MO, bases totales y de cambio, Disolución selectiva de Fe y Al, Fe total, Al total, P total, P asimilable y S total).

El análisis de los datos se realizó utilizando diversos enfoques: univariado (estadística descriptiva) y multivariado; el cual aportó información acerca de la variación de las propiedades. Las propiedades con mayor heterogeneidad entre los suelos fueron P, K total y Na total, el resto presentó una variabilidad moderada; los resultados del ANOVA

multivariado muestran diferencias estadísticas entre las zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción para la mayoría de las propiedades estudiadas, excepto la relación C/N, S total, Na^+ , K^+ y Ca^{+2} , los valores medios de las diferentes propiedades para los suelos de bosques superan los valores medios para suelos de cultivos. El análisis factorial por componentes principales permitió reducir el conjunto original de variables, reteniendo seis nuevas variables sintéticas que explicaron en conjunto el 83,3% de la variabilidad total presente en la matriz original de observaciones. Mediante el análisis de clasificación discriminante se pudo determinar que las propiedades más susceptibles al cambio en el uso del suelo fueron, Fe total, Mg total, pH, C total, Da y consideradas como predictoras significativas por sí solas N total, C total, MO y Da.

Los resultados de la extracción selectiva de Fe y Al, muestran que en su mayoría el Fe se encuentra formando oxihidróxidos cristalinos y en una proporción muy baja ligado a compuestos orgánicos, lo que refleja una pobre evolución del humus en las zonas estudiadas. La extracción de Al con Ditionito resultó muy poco eficaz, probablemente poco presencia del Al ligado a los óxidos de Fe cristalinos; el Al extraído con Oxalato amónico representó solo el 3% del Al total, lo que sugiere un alto porcentaje de Al formando parte de estructuras cristalinas.

Capítulo 4. Efectos del uso de los suelos sobre las formas y contenidos de carbono

Para evaluar el efecto de diferentes usos del suelo, en las diferentes formas de Carbono estudiadas, se seleccionaron seis zonas de muestreo, en suelos al norte del departamento del Magdalena (Colombia), que permiten representar los suelos de cultivos agrícolas de mayor importancia y suelos de bosques aledaños a los cultivo, localizados entre 0-1000 msnm; en cada zona se muestrearon dos sitios: cultivo y bosque respectivamente; en cada sitio se tomaron cuatro muestras compuestas. Las formas de C determinadas fueron: el Carbono total (**Ct**), el Carbono oxidable total (**Cox**), el Carbono hidrolizable con HCl 6N (**Ch**), el Carbono, ligado al material húmico (**Cp**) mediante una extracción con pirofosfato sódico, la fracción de Carbono no oxidable (**Cnox**) o C recalcitrante se calcula por la diferencia Ct-Cox; la diferencia entre Cox- Cp, corresponde a las formas no complejadas y lentamente oxidables (**Cdiox**); los contenidos de Carbono total (**eCt**) por unidad de superficie se calcularon teniendo en cuenta la Da y la profundidad de muestreo.

Se encontraron diferencias estadísticas significativas por el efecto de las zonas, encontrándose los mayores valores de Nt (0.32), Ct (3.90), Cox (3.85), Ch (2.05) y Cp (1.15) en los suelos de bosques de la zona 1, la de mayor altitud (956 msnm) y precipitación (2000 mm) y temperatura más baja (24°C) y la única en la que el balance de agua mensual señala la existencia de agua infiltrada de acuerdo a los datos climáticos descritos en los capítulos 1 y 2; en relación a los usos del suelo solo presentaron diferencias significativas: Nt, Ct, Cox y Ch en general los valores de las formas de C más estables para los suelos de bosques superaron los de los suelos de cultivos. El Cox y Cnox representaron el 95% y 5% del C total respectivamente para los diferentes usos del suelo.

La mayor acumulación de Ct se presentó en la zona 1, suelos de bosque (109 t ha⁻¹) y la menor en la zona 3 suelos de cultivo (32 t ha⁻¹) y en promedio se presentó una pérdida del 26% del Ct por efectos del cambio de usos del suelo de bosques a cultivos.

Capítulo 5. Respiración del suelo y su relación con algunas formas de Carbono

Las prácticas de uso y manejo de los suelos, pueden afectar notablemente las fracciones lábiles y humificadas de su materia orgánica, en detrimento de la actividad biológica. El presente estudio se propuso evaluar el efecto que sobre la respiración tienen los cambios de uso del suelo y su relación con algunas formas de Carbono. Para la tasa de respiración medida por gramo de suelo y por gramo de Carbono oxidable (Cox), se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las zonas de estudio, diferenciándose claramente dos grupos de zonas, un primer grupo (Zonas 1.2 y 3) con tasas de respiración que oscilaron entre 3 y 4 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$; 124,5 y 279.5 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$ y un segundo grupo (Zonas 4,5 y 6) con tasas de 0,9 y 1.9 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$; 72,8 y 95,3 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$; la variable respiración por gramo de Cox, observó diferencias estadísticas entre usos del suelo, registrándose para bosques una tasa de respiración con 27,42 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$ menos que los suelos de cultivo. En general la respiración del suelo se correlacionó positivamente con todas las formas de C estudiadas, excepto la forma no oxidable, confirmando su carácter recalcitrante. La actividad biológica por gramo de suelo fue mayor en suelos de bosques 2,74 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ frente a una tasa media de 2,20 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ para los suelos cultivados, en contraste con la respiración media en función de Cox, donde los suelos de bosques presentaron menores emisiones de CO₂, corroborando que un manejo inadecuado de los suelos de cultivo puede incrementar las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Las prácticas de uso y manejo de los suelos, pueden afectar notablemente las fracciones lábiles y humificadas de su materia orgánica, en detrimento de la actividad biológica. El presente estudio se propuso evaluar el efecto que sobre la respiración tienen los cambios de uso del suelo y su relación con algunas formas de Carbono. Para la tasa de respiración medida por gramo de suelo y por gramo de Carbono oxidable (Cox), se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las zonas de estudio, diferenciándose claramente dos grupos de zonas, un primer grupo (zonas 1,2 y 3) con tasas de respiración que oscilaron entre 3 y 4 ug C-CO₂ g⁻¹ suelo h⁻¹; 124,5 y 279,5 ug C-CO₂ g⁻¹ Cox h⁻¹ y un segundo grupo (Zonas 4, 5 y 6) con tasas de 0,9 y 1,9 ug C-CO₂ g⁻¹ suelo h⁻¹ ; 72,8 y 95,3 ug C-CO₂g⁻¹ Cox.h⁻¹; la variable respiración por gramo de Cox, observó diferencias estadísticas entre usos del suelo, registrándose para bosques una tasa de respiración con 27,42 ug C-CO₂g⁻¹ Cox h⁻¹ menos que los suelos de cultivo. En general la respiración del suelo se correlacionó positivamente con todas las formas de C estudiadas, excepto la forma no oxidable, confirmando su carácter recalcitrante. La actividad biológica por gramo de suelo fue mayor en suelos de bosques 2,74 ug C-CO₂ h⁻¹g⁻¹ suelo frente a una tasa media de 2,20 ug C-CO₂ h⁻¹g⁻¹suelo para los suelos cultivados, en contraste con la respiración media en función de Cox, donde los suelos de bosques presentaron menores emisiones de CO₂, corroborando que un manejo inadecuado de los suelos de cultivo puede incrementar las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Capítulo 6. Composición molecular de la materia orgánica extraíble con NaOH: un estudio con pirólisis (P-CG/EM)

El presente estudio se propuso determinar la composición molecular de la materia orgánica (MO) en suelos con diferentes usos; para ello se caracterizó por pirólisis (acoplada a cromatografía de gases y espectroscopía de masas), la MOS extraída con NaOH, de muestras superficiales de suelos cultivados y de bosques, en 6 zonas del clima cálido tropical del departamento de Magdalena (Colombia). Como producto del análisis fueron cuantificados 110 productos de pirólisis en la siguiente proporción: compuestos con N (34,1 ± 5.1 %), polisacáridos (21,1 ± 7,1 %), aromáticos (20,0 ± 4,5 %), alifáticos (7,7 ± 1,4 %), fenoles (7,0 ± 5,0 %), poliaromáticos (3,6 ± 0,9 %), ligninas (0,3 ± 0,3 %) y compuestos no identificados (0,2 ± 0,1 %). A través del análisis de varianza no se encontraron diferencias estadísticas entre los productos de pirólisis para usos del suelo (bosque y cultivados), pero si para las

zonas muestreadas. Por otro lado el análisis factorial por componentes principales permitió reducir el conjunto de compuestos productos de pirólisis en dos variables sintéticas que explicaron el 51 de la variabilidad total. Aunque en todas las zonas se evidenció una MOS con un grado importante de descomposición, el factor 1 permitió separar entre MOS de origen microbiano relativamente descompuesta y MOS fresca o de descomposición lenta y de origen vegetal. En términos generales las zonas 1, 3 y 4 mostraron una contribución relativamente alta de MOS microbiana y en menor proporción de MOS de origen vegetal tanto para suelos de bosques como para suelos de cultivo, en contraste con las zonas 2, 5 y 6 que presentaron mayor proporción de MOS de origen vegetal, destacando la zona 6 donde se presentó evidencias que caracterizan al material quemado.







Capítulo 1

Una visión general a los suelos de Colombia y sus principales usos, con énfasis en el departamento del Magdalena



UNA VISIÓN GENERAL A LOS SUELOS DE COLOMBIA Y SUS PRINCIPALES USOS, CON ÉNFASIS EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA

1. Generalidades.

Colombia se encuentra ubicada en los 17° latitud norte y 4° latitud sur en la zona tropical, entre los 4°39' Norte y 74°3' Oeste; su territorio ocupa una superficie de 2129748 km²; 1141748 km² corresponden al territorio continental y 988000 km² a la extensión marítima (Figura 1).

Debido a su ubicación, Colombia es un país húmedo y cálido en un 80% de su territorio y 20% seco en el restante. Debido a su ubicación, Colombia es un país húmedo y cálido en un 80% de su territorio y 20% seco en el restante. El relieve colombiano, está dominado por la orogenia andina, como consecuencia de la posición geográfica de Colombia, en el noroccidente de la placa suramericana en un sitio de choque con la placa oceánica del pacífico, se presentó el movimiento de subducción, causante del levantamiento de tres cordilleras (Central, Occidental y Oriental). Así la cordillera central se formó en el paleozoico a partir de un geosinclinal que bordeaba el margen noroccidental del escudo Guayanés, con intrusiones graníticas y metamorfismo. La cordillera occidental se constituyó a partir de un geosinclinal durante el mesozoico; su origen está ligado a la corteza oceánica, a diferencia de los macizos graníticos de la cordillera Oriental y del sector oriental de la Central, que las relaciona con la corteza continental. Finalmente la cordillera Oriental se formó en el terciario superior luego de que la cuenca creada por la cordillera Central se rellenara con sedimentos , estos emergieron cuando un movimiento continental hacia el occidente hizo que el escudo Guayanés ejerciera presión sobre la cordillera. Los paisajes dominantes del país son los de lomerío (35%), a menos de 300 msnm, con pendientes entre el 7 y 12%; montaña (25,5%) alturas superiores a los 300 msnm, con pendientes superiores al 30%; valles y planicies (20%); ellos corresponden al 80,5% del territorio; el 19,5% restante está representado por piedemontes, altiplanicies y superficies de aplanamiento. La morfología y génesis -evolución de estos paisajes influye en las de los suelos debido a la estrecha correlación suelo-paisaje, en la cual la estabilidad de las geoformas (pedogénesis progresiva o regresiva) y sus materiales constituyentes, coadyuvan a la evolución de los suelos (Malagón, 2003).

La clasificación de los regímenes de temperatura y de humedad del suelo según la SSS (1999), describen al régimen isohipertérmico (temperatura media anual mayor de 22 °C), como el dominante en Colombia, pudiéndose estimar alrededor del 80-85%; siguen a continuación el isotérmico (entre 15 y 22 °C), con el (11-12%), isoméxico (entre 8 y 15 °C) con el 6% y los más fríos, isofrígido y crítico (temperaturas menores de 8 °C) entre 1-1,5%.

El régimen predominante de humedad es el údico (incluyendo el perúdico), estimado, no determinado, en cerca del 65 - 70% del país; le sigue el ústico (con sus transiciones tanto hacia el údico como hacia el arídico) (rango 15 - 20%) y, presentándose en porcentajes bajos (entre 1 y 2%), el arídico. Las condiciones ácuicas (presentes en zonas depresionales y en vecindades de cuerpos de agua) se distribuyen en todo el país; se estiman con datos del (IGAC, 2003) en cerca de 8626700 ha (7,6% del territorio).

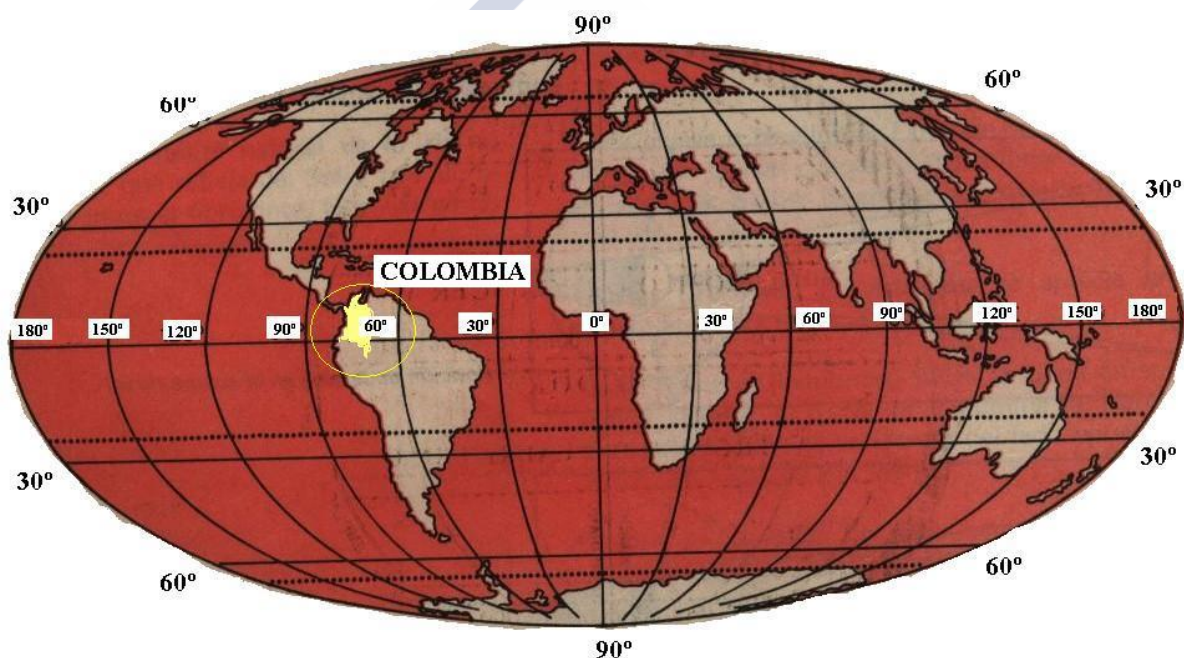


Figura 1. Ubicación Geográfica de Colombia. Fuente: <http://goo.gl/Z1tBFS>¹

Los principales tipos de materiales que originan los suelos están relacionados con rocas sedimentarias, sedimentos y piroclastos, los cuales constituyen más del 80% de los materiales formadores de los suelos colombianos (IGAC y CORPOICA, 2002); el porcentaje restante incluye rocas ígneas, metamórficas y asociaciones de ellas (Figura 2). Para obtener

¹ Recuperado el día 12 de Octubre de 2013

² Tomado de Jaramillo, D. 2002. Libro Introducción a la Ciencia del Suelo. Capítulo 24

una información más detallada de éstos materiales parentales, es conveniente analizar este aspecto en las diferentes regiones naturales de Colombia. (Jaramillo, 2002)². (Figura 4)

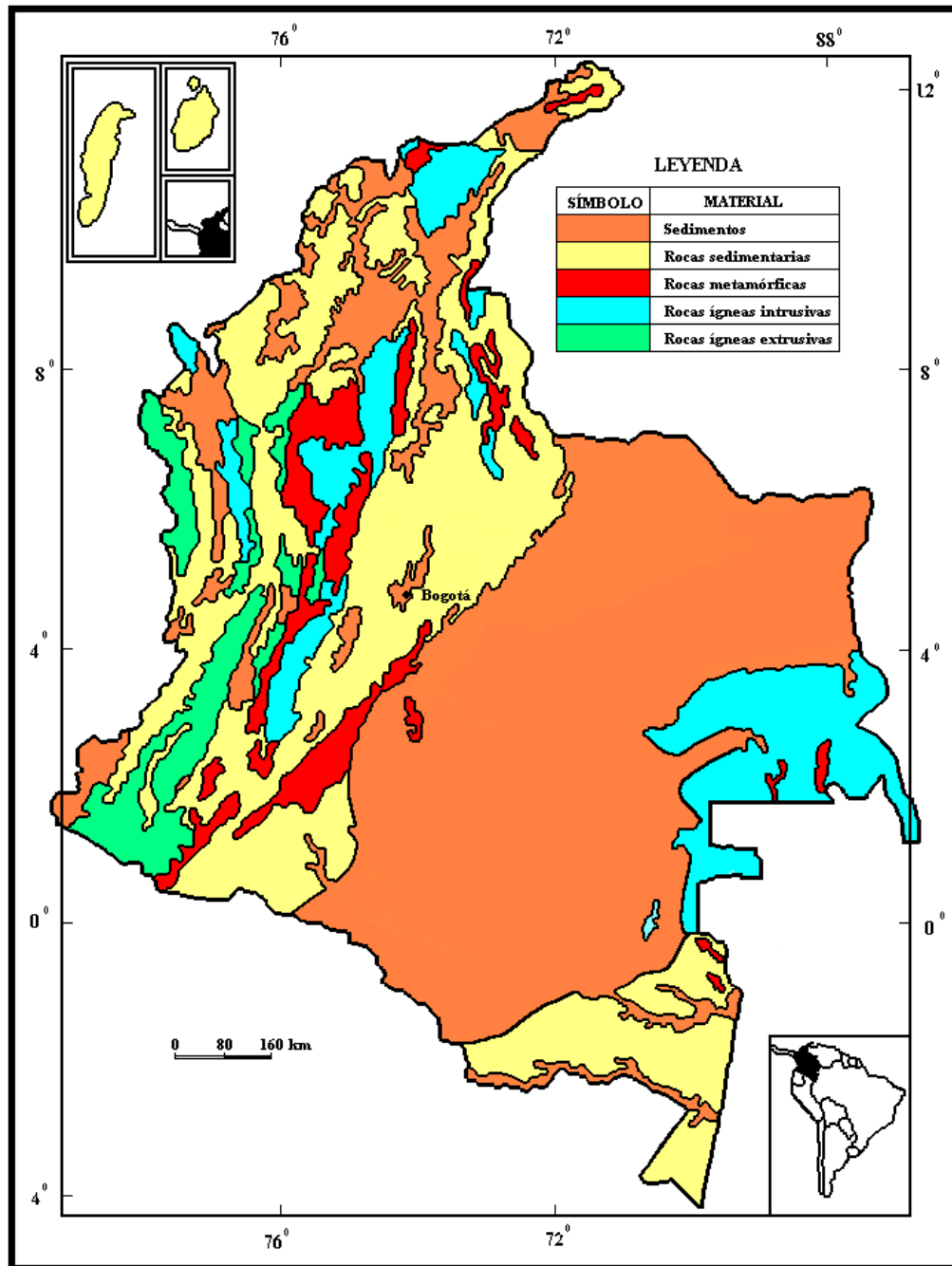


Figura 2. Distribución generalizada de los grupos de rocas y de sedimentos no consolidados en Colombia. Tomado de Jaramillo 2002

Así vemos como en la **Región de la Amazonía** según el mapa geológico presentado por Malagón *et al.* (1995) se observa que los materiales litológicos que predominan en esta región son los sedimentos aluviales y algunos pocos lacustres, seguidos por rocas

² Tomado de Jaramillo, D. 2002. Libro Introducción a la Ciencia del Suelo. Capítulo 24

sedimentarias (areniscas, conglomerados, calizas y shales), rocas ígneas (migmatita, sienita, riolacita, aglomerados y tobas) y rocas metamórficas (neis, esquisto, cuarcita y anfibolita); En la amazonia predominan los Inceptisoles distróficos, que ocupan aproximadamente el 48% de su área; le siguen los suelos del orden Oxisol con 26% de cobertura areal y los Entisoles, también de carácter distrófico, con 24%. Lo anterior da idea de la baja fertilidad que tienen los suelos de la amazonia colombiana, a pesar de sostener, en buena parte de su área, una vegetación exuberante. Las condiciones de pobreza de dichos suelos se confirman al observar los datos suministrados por los estudios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1988) que muestran que en ellos, más del 95% de la composición de la fracción arena está formada por cuarzo y que en la fracción arcilla los minerales dominantes son la caolinita y la gibsita. Además, en los mismos documentos se aprecia que en esta región todos los suelos son ácidos y tienen bajos contenidos de materia orgánica.

En la **Región de la Orinoquía** predominan ampliamente los sedimentos aluviales y los eólicos como material parental de los suelos, aunque también hay áreas considerables donde se encuentran expuestas rocas metamórficas como cuarcita, neis, anfibolita, esquistos y rocas ígneas como granito y sienita. Botero et al. (1997) incluyen en esta región un área colinada estructural de las estribaciones de la cordillera oriental formada por rocas sedimentarias (arenisca, conglomerado, lutitas y calizas). Se destaca el amplio dominio que tienen en esta región los suelos de los órdenes Ultisol y Oxisol. Según IGAC (1988), también en estos suelos, como en los de la amazonia, predominan el cuarzo en la fracción arena y la caolinita, con o sin gibsita, en la fracción arcilla. Además, aquí también todos los suelos son ácidos y presentan bajos contenidos de materia orgánica.

En la **Región del Pacífico** los materiales parentales de sus suelos están dominados por las rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, shale, chert, caliza) y los sedimentos aluviales, marinos y lacustres, aunque también se encuentran rocas ígneas como gabros y peridotitas. Predominan en esta región los suelos de los órdenes Inceptisol y Entisol. De los estudios de IGAC (1988) se establece que el mineral dominante en la fracción arena de estos suelos es el cuarzo y en la fracción arcilla la caolinita; además, presentan bajos contenidos de materia orgánica y todos tienen pH muy ácido.

En la **Región Andina**, aunque no es la de mayor extensión, sí es la que tiene mayor variabilidad en todos sus componentes. Comprende toda la zona montañosa colombiana, representada por las cordilleras occidental, central y oriental, y por la sierra de La Macarena,

además de los altiplanos que se encuentran localizados en ellas. Presenta casi todas las condiciones climáticas por efecto de la variación en la altitud con respecto al nivel del mar y prácticamente todos los materiales parentales y relieves:

En la *Cordillera occidental* predominan las rocas sedimentarias (arenisca, chert, caliza, conglomerado); se presentan rocas ígneas como basalto, diabasa, andesita, gabro, tonalita, granodiorita, granito y aglomerados, al igual que recubrimientos con ceniza volcánica; también se encuentran sedimentos no consolidados aluviales. *Cordillera central*: el principal material parental de los suelos en esta cordillera lo constituye la ceniza volcánica. Hay áreas importantes de rocas ígneas (granodiorita, cuarzdiorita, gabro, granito, tonalita, basalto, lavas, aglomerados, toba e ignimbrita), así como de rocas metamórficas (esquistos, cuarcita, filita, anfibolita, neis y mármol) y de rocas sedimentarias (arenisca, chert, conglomerado y caliza). También se encuentran áreas amplias con sedimentos aluviales y en las partes altas, con sedimentos glaciales y lacustres. *Cordillera oriental*: dominada por las rocas sedimentarias (arenisca, lutita, caliza, conglomerado y shale) también presenta importantes áreas de rocas metamórficas (esquisto, cuarcita, filita, anfibolita, mármol, pizarra y neis), así como de rocas ígneas (granodiorita, gabro, granito y sienita). Se presentan depósitos de sedimentos lacustres, aluviales, glaciales, además de amplias zonas con cobertura de ceniza volcánica. *Sierra de la Macarena*: dominan las rocas ígneas (sienita y migmatita) y las rocas sedimentarias (shale, arenisca, conglomerado y caliza). La mayoría de los suelos de la región andina corresponden a los órdenes Inceptisol y Entisol y, además, que predominan los suelos con baja saturación de bases. Solamente en aquellos climas más secos se presentan suelos de los órdenes Alfisol y Mollisol, con mejores condiciones de saturación. En las áreas que presentan influencia de ceniza volcánica son dominantes los suelos del orden Andisol, los cuales también son desaturados (Jaramillo, 1995; Malagón et al., 1991). El régimen de humedad del suelo que tiene mayor cobertura areal es el údico. Según IGAC (1988), la mayor parte de los suelos de la zona andina colombiana presentan pH ácido y contenido bajo a medio de materia orgánica. En buena parte de las cordilleras predomina el cuarzo en la fracción arena, seguido por el feldespato, los anfíboles y las micas; donde hay recubrimientos de ceniza volcánica también se presenta vidrio volcánico en esta fracción. Según IGAC (1988), prácticamente en toda la cordillera central la fracción arcilla está dominada por alofano y caolinita, mientras que en el resto de la región el mineral dominante en la fracción arcilla es la caolinita, acompañada de cuarzo y/o gibsita (Figura 3).

La *Región Caribe*, comprende las planicies fluviales, fluvio – deltaicas, fluvio – lacustres, marinas y eólicas, así como una amplia zona colinada formada sobre rocas sedimentarias, principalmente arenisca, arcillolita, conglomerado y caliza (Malagón et al., 1995). Se ubica entre las estribaciones de las cordilleras central y occidental y el mar Caribe, en el norte del país. Toda la región se ubica en el piso térmico cálido (régimen isohipertérmico) y presenta, según Claro (1997), las siguientes condiciones climáticas: Temperatura media anual de 27,6 °C, con variaciones entre 25 y 31 °C. La humedad relativa varía entre 75 y 86%. La precipitación aumenta desde la costa hacia el interior; se presenta un promedio cercano a los 1000 mm año⁻¹ en la costa y se llega a casi 3000 mm año⁻¹ en las estribaciones de las cordilleras. Entre abril y noviembre cae aproximadamente el 93% de la precipitación total. La zona más seca se ubica en el litoral entre las ciudades de Santa Marta y Cartagena y tiene una precipitación promedio anual ligeramente superior a los 500 mm. La evapotranspiración potencial aumenta del noroccidente hacia el nororiente con valores comprendidos entre 1300 y 2100 mm año⁻¹. Los suelos de esta región se ubican predominantemente en los órdenes Inceptisol y Entisol; también son comunes los suelos de los órdenes Alfisol, Mollisol y Vertisol. Debido a que en esta zona predominan las condiciones de clima seco (régimen de humedad ústico), los suelos se presentan con alta saturación de bases, a veces excesiva (suelos salinos, calcáreos y sódicos) y pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino. Según Malagón y Santana (1997) los suelos poseen un contenido bajo a muy bajo de materia orgánica, alto contenido de potasio y tienen su fracción arcilla dominada por arcillas esmectíticas. Según IGAC (1988) en la fracción arena predominan el cuarzo y los feldespatos. Las características enumeradas anteriormente dan razón de los altos niveles de fertilidad que poseen los suelos de esta región.

En esta región se encuentra *Sierra nevada de Santa Marta* con una variación altitudinal entre los 0 y 5800 m; lo que le imprime una gran variedad climática y por ende una inmensa biodiversidad, son importantes las rocas ígneas (granodiorita, tonalita granito y toba), las rocas metamórficas (esquistos, cuarcita, filita, anfíbolita, neis y migmatita), las rocas sedimentarias (arenisca, chert, caliza y conglomerado) y los sedimentos aluviales, glaciales y lacustres; el 48% de los suelos pertenece al orden de los Inceptisoles, el 27% entisoles, el 18% a Molisoles y el porcentaje restante entre Alfisoles y Oxisoles. De igual manera se encuentra una región particular denominada Alta y Media Guajira formada por una península ubicada en el extremo norte del país. Es la zona más seca de Colombia presentando una condición de humedad semiárida y un régimen de humedad edáfico arídico, aunque hay pequeñas áreas con

régimen ústico. La condición de sequía es tan intensa que según Córdoba et al. (1978) en uno de cada dos años la estación biológicamente seca se prolonga por 8 meses o más tiempo.



Figura 3. Mapa físico-político de Colombia.

Según Claro (1997) la humedad va aumentando hacia el sur de la península, siendo la precipitación máxima de casi 1000 mm año⁻¹ en el sur y de menos de 500 mm año⁻¹ en el litoral norte. La temperatura promedio anual de la región se encuentra entre 26 y 29 °C. Malagón et al. (1995) resaltan los sedimentos aluviales, marinos y eólicos como los principales materiales parentales de los suelos, seguidos por las rocas sedimentarias (caliza,

arenisca, conglomerado, lutita), las metamórficas (esquisto, filita, neis, anfibolita) y las ígneas (granodiorita, diorita, riodacita). En esta región predominan ampliamente los suelos del orden Aridisol, con bastantes grandes grupos de suelos calcáreos y sódicos, acpañados frecuentemente por suelos del orden Entisol. Según IGAC (1988) en la fracción arena predominan el cuarzo y los feldespatos y en la fracción arcilla las esmectitas. En esta región se encuentran los suelos con los menores contenidos de materia orgánica del país y, prácticamente en todos, la reacción es alcalina ($\text{pH} > 7,5$).

Se distinguen otras regiones (Figura 4) determinadas por los valles de los dos principales ríos del país Magdalena y Cauca; Valle del Magdalena Toda la zona se encuentra en el piso cálido y según Castro (1996), en el alto Magdalena la condición de humedad dominante es la subhúmeda, con precipitaciones promedias anuales entre 1100 y 1300 mm, con evapotranspiración entre 1400 y 2000 mm año^{-1} . Cortés (1982) define una condición de humedad entre húmeda y muy húmeda, con precipitaciones entre 2000 y aproximadamente 3500 mm año para el Magdalena medio. Con respecto a los materiales parentales de los suelos, según Malagón et al (1995) predominan los sedimentos aluviales y lacustres, seguidos por las formaciones rocosas sedimentarias de areniscas, conglomerados y calizas. Según el IGAC (1988) el régimen de humedad de los suelos va de ústico, en el sur, hasta ácuico en el norte, pasando por una zona de transición údica en la parte media de la región. El régimen de temperatura es isohipertérmico.

En esta región los suelos se agrupan principalmente en los órdenes Inceptisol y Entisol, aunque hay áreas importantes de Alfisoles y Mollisoles en el alto Magdalena y de Alfisoles y Ultisoles en el Magdalena medio. Los cambios de humedad controlan fuertemente el tipo de suelo que se genera en esta zona. En las áreas más húmedas (Magdalena medio), los suelos son de menor calidad agronómica puesto que, según IGAC (1988), en ellos predomina el cuarzo en la fracción arena y la caolinita y algunos intergradados en la fracción arcilla y tienen pH muy ácido, mientras que en el alto Magdalena (más seco), en la fracción arena predominan cuarzo y feldespato, en la fracción arcilla predominan las esmectitas y los pHs son moderadamente ácidos a neutros, generándose suelos de mejor calidad en esta subregión. En cuanto al Valle del río Cauca sus áreas están ubicadas en los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, entre los municipios de Santander de Quilichao, al sur y Cartago, al norte. Según Malagón et al., (1995) los materiales parentales que predominan en esta región corresponden a sedimentos aluviales y algunos lacustres. Las colinas que se incluyen en ella

se han desarrollado sobre rocas sedimentarias como arcillolita, arenisca, conglomerado, caliza y diatomita. Según cálculos presentados por Quintero y Castilla (1992), en esta región predominan los suelos del orden Mollisol (36% del área), seguidos por los órdenes Inceptisol (26%), Vertisol (21%), Entisol (10%) y Alfisol (5%). Según IGAC (1988) en la región predominan los suelos con pH en el rango neutro, con contenido medio de materia orgánica, con una fracción de arena compuesta por feldespato, anfíboles y cuarzo y de arcilla por esmectitas y caolinita. Aunque se presentan áreas importantes de suelos afectados por sales y por sodio, los suelos de esta región son, en su mayoría, de alta calidad para las actividades agropecuarias.

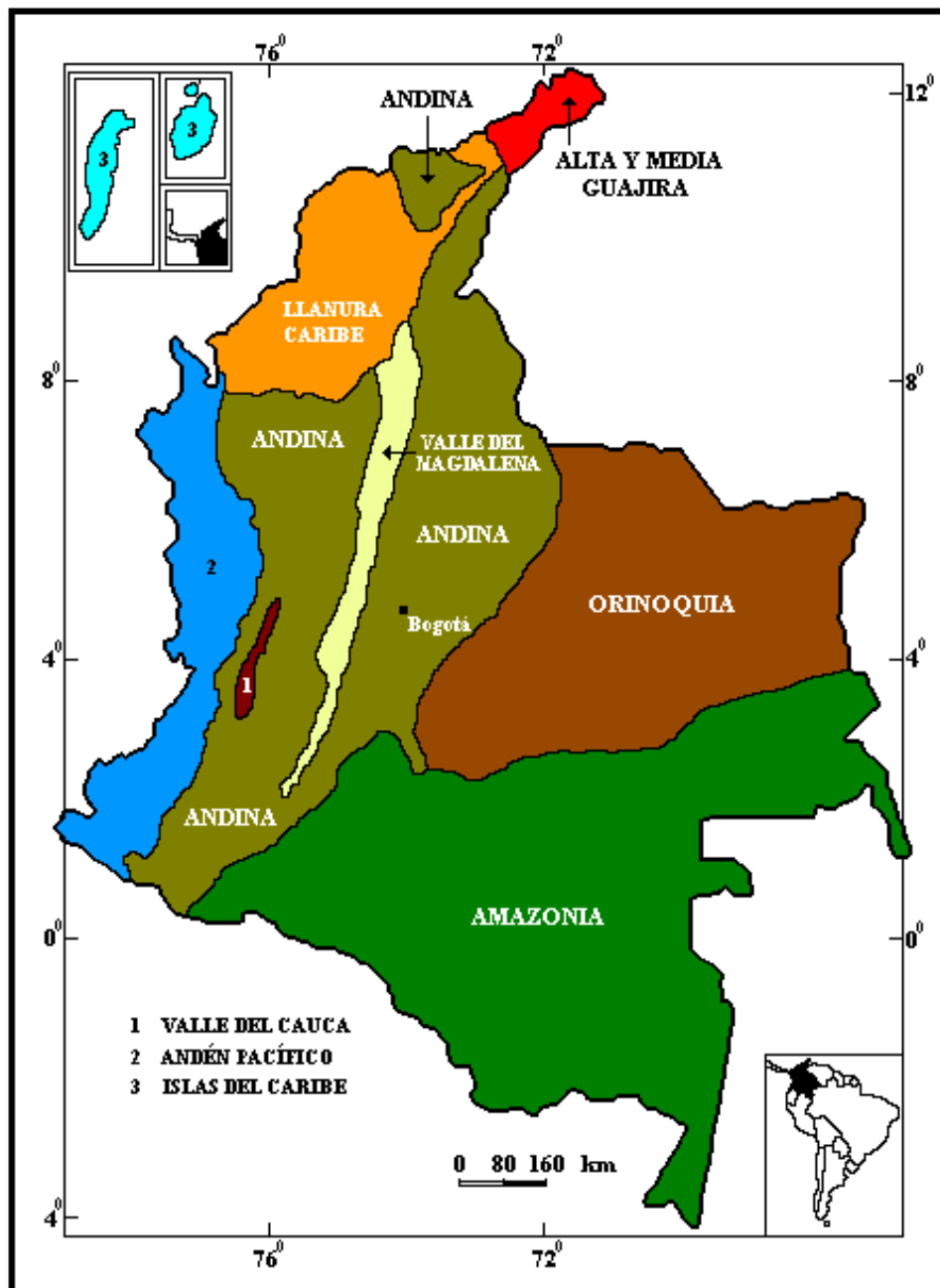


Figura 4. Regiones Naturales de Colombia (Jaramillo, 2002).

En resumen, según el mapa de suelos de Colombia del IGAC (2003), (Figura 5), la distribución de los órdenes de suelos en el país corresponde a las siguientes proporciones: Inceptisol (31,4%), Entisol (24,3%), Oxisol (20%), Ultisol (10,1%), Andisol (4,5%), Mollisol (1,2%), Espodosol (0,9%), Alfisol (0,8%), Vertisol (0,6%), Histosol (0,5%) y Aridisol (0,4%).

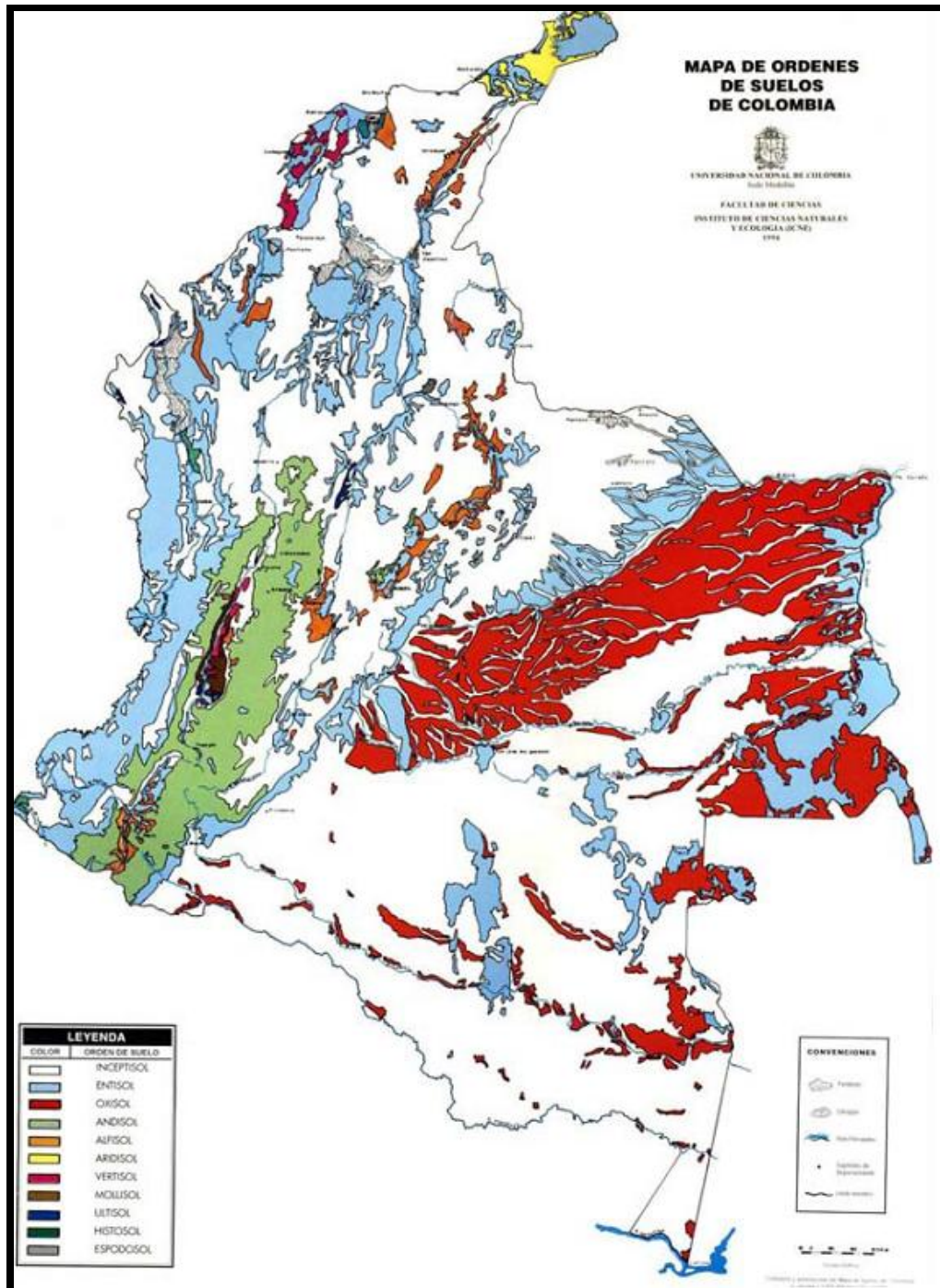


Figura 5. Distribución de los suelos de Colombia, agrupados por orden taxonómico.

2. Distribución y uso del suelo.

Tabla 1. Distribución de la vocación de uso de las tierras en Colombia, 2002 (miles de ha).

VOCACIÓN DE USO*					
Agrícola	Ganadera	Forestal	Agroforestal	Conservación	Total
21,493	14,223	21,591	6,908	49,652	113,869
18,9%	12,5%	19,%	6,1%	43,5%	100%

Fuente: IGAC-Corpoica, (2002). *En el total no se incorpora el 0.08% de las tierras con construcciones (87230 ha).

Tabla 2. Distribución porcentual del uso actual de las tierras en Colombia y Magdalena.

	USO ACTUAL (en %)				
	Agrícola	Agroforestal	Ganadera	Forestal	Conservación
COLOMBIA	4,6	3,2	23,2	9,8	58,7
MAGDALENA	9,4	3,5	53,0	10,2	18,1

Fuente. IGAC-Corpoica, 2002

En relación con la ocupación y vocación de uso de las tierras, se entiende que existe suficiente extensión de tierras apropiadas para el desarrollo de actividades productivas agrícolas, pecuarias y forestales (Tabla 1 y Tabla 2), alrededor del 60% de los productores; del 70% de las actividades agropecuarias del país, son pequeños.

Algunos sectores del departamento del Magdalena se caracterizan por presentar como principal actividad la agricultura; dentro de los principales cultivos se pueden nombrar la palma africana en los municipios de Fundación, Aracataca, El Retén y Pueblo Viejo principalmente, el banano, ubicado en la llamada Zona Bananera comprende unas 12257 ha, situadas principalmente en el norte del territorio, entre Ciénaga y Fundación, según estadísticas de la Asociación de bananeros de Colombia AUGURA-ICA; el café, establecido principalmente en áreas de la Sierra Nevada de Santa Marta, cubre cerca de 19908 ha (anuario estadístico agropecuario del Minagricultura); también se cultiva maíz tradicional, yuca, arroz bajo riego, sorgo, algodón, coco, cacao, tabaco negro tipo exportación, fríjol, ñame y plátano (IGAC, 2009).

La agricultura representa el 8% del PIB nacional y el 20% de los empleos del país (Encuesta Nacional Agropecuaria, 2007). El 9,4% de las tierras en el departamento del Magdalena (215000 hectáreas aproximadamente) están dedicadas actualmente a la actividad agrícola, en la cual vale la pena destacar los siguientes cultivos:

Palma Africana (*Elaeis guineensis*). La palma de aceite es una planta oleaginosa originaria del oeste africano cuyo tallo puede alcanzar más de 30 metros de altura y produce racimos de frutos compactos que pueden pesar entre 10 y 40 kilogramos. Se caracteriza por ser la oleaginosa más productiva del planeta. Aunque la vida productiva de la palma es mayor a cincuenta años, la altura que alcanza a los 20 ó 25 años dificulta las labores de cosecha, lo cual indica el comienzo de la renovación en las plantaciones comerciales. Para la expansión y renovación del cultivo de la palma de aceite se debe contar con el material genético con un alto potencial de rendimiento, adaptado a las zonas productoras resistente a las enfermedades y tolerantes a plagas. En la actualidad se acepta en la industria de la palma de aceite, que los mejores materiales plantables, se obtienen de la cruce la Deli Dura con la Pisífera Africana; entre otras variedades recomendadas están : Yangambi, Deli x Avros, Deli x Lomes, Deli x Nigeria y Deli x Gana. El área total sembrada en Colombia es de 452435 ha, y de 24000 ha en el departamento del Magdalena, la producción promedio en la zona norte del país es de 16,97 ton de racimos de fruto ha⁻¹; 3,42 ton de aceite crudo ha⁻¹ (Fedepalma, 2012).

Este cultivo se establece muy bien en suelos de textura franco arcillosa, buen drenaje, topografía plana hasta 2% de pendiente y en zonas con temperaturas entre 26 – 28 °C, con mínimas mensuales no inferiores a 21°C, precipitaciones entre 1800 y 2300 mm media anual y con alta luminosidad; en palmas adultas, con una producción de 25 t/ha de racimos de fruta fresca, reporta estimados de absorción de 192,5, 26, 251,4, 61,3 y 99,3 Kg ha⁻¹ de N, P, K, Mg y Ca, respectivamente. Finalmente, una fracción muy importante es sacada del sistema en la cosecha, indicando que una cosecha de 25 t/ha, contiene 73,2, 11,6, 93,4, 20,8 y 17,5 Kg de N,P, K, Mg y Ca respectivamente. Inicialmente la semilla es sembrada en un pre-vivero, en donde se mantiene por aproximadamente tres meses. En esta etapa, las mejores plántulas son seleccionadas para ser trasplantadas a un vivero, en donde se mantienen por unos 9 -11 meses adicionales. Después de una selección rigurosa al final de la etapa de vivero, las plantas se siembran en el campo siguiendo un patrón de "tres bolillos" o siembra en triángulo, en donde cada una ocupa la esquina de un triángulo equilátero de nueve metros de lado.

De acuerdo con Fedepalma (federación colombiana de cultivadores de Palma africana), los frutos de color naranja rojizo contienen en su interior una única semilla, llamada almendra o palmiste, protegida por una pulpa carnosa de la que se obtiene el aceite de palma propiamente dicho. El aceite de palmiste, semisólido o sólido a temperatura ambiente, se derrite por encima de los 30 grados centígrados. La extracción del aceite se realiza en núcleos

de producción palmera, conformados por la planta extractora y el respectivo cultivo o conjunto de cultivos. Debido a que el fruto es muy perecedero después del corte, estos últimos deben ubicarse cerca de la planta extractora. “El proceso de extracción consiste en esterilizar los frutos, desgranarlos, macerarlos extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante”. Luego, el aceite de palma recibe un proceso de refinación para reducir la humedad, blanquearlo y desodorizarlo. Usualmente se presenta al consumidor mezclado con otros aceites vegetales. Del aceite de palma se obtienen a su vez dos productos: la oleína, sustancia líquida que se puede mezclar con otros aceites vegetales; y la estearina de palma, más sólida, que sirve para producir grasas para la elaboración de margarinas y jabones.

Banano (*Musa sp*). El banano no es considerado un árbol, sino una megaforbia, una hierba perenne de gran tamaño. Como las demás especies de *Musa*, carece de verdadero tronco. En su lugar, posee vainas foliares que se desarrollan formando estructuras llamadas pseudotallos, similares a fustes verticales de hasta 30 cm de diámetro basal que no son leñosos, y alcanzan los 7 m de altura. El banano pertenece al orden Zingiberales, familia Musaceae y género *Musa*. Las especies más destacadas son: la *Musa acuminata* Colla que ha dado origen a las variedades comerciales, *Musa balbisiana* Colla y *Musa acuminata* diploide, se destacan los clones: Williams, Gross Michel, Valery o robusta y el clon Gran Enano. En Colombia existen dos zonas productoras de banano, una ubicada en el Urabá departamento de Antioquia y la zona bananera del departamento del Magdalena, el total sembrado en producción es de 47000 ha de las cuales 12257 ha están en el Magdalena con una producción media de 33,5 ton ha⁻¹ (Augura, 2009).

Unos 10 a 15 meses después del nacimiento del pseudotallo, cuando éste ya ha dado entre 26 y 32 hojas, nace directamente a partir del rizoma una inflorescencia, El fruto tarda entre 80 y 180 días en desarrollarse por completo. En condiciones ideales fructifican todas las flores femeninas, adoptando una apariencia dactiliforme que lleva a que se denomine las hileras en las que se disponen. Puede haber entre 5 y 20 manos por espiga, aunque normalmente se trunca la misma parcialmente para evitar el desarrollo de frutos imperfectos y evitar que el capullo terminal insuma las energías de la planta. El punto de corte se fija normalmente en la "falsa mano", una en la que aparecen frutos enanos. En total puede producir unos 300 a 400 frutos por espiga, pesando más de 50 kg.

Este cultivo se establece muy bien en suelos de textura franca, buen drenaje, pH entre 6,6 y 7,0, topografía plana entre los 10 y 50 m de altitud sobre el nivel del mar, con

temperaturas entre 26 – 27 °C media anual, con mínimas no inferiores a 18°C y máximas hasta de 36°C, precipitaciones entre 1000 y 1700 mm media anual. El banano para una producción óptima requiere en promedio las siguientes dosis de nutrientes: 50 kg de P₂O₅ ha año⁻¹, 700 kg de K₂O ha año⁻¹, 560 kg de CaO ha año⁻¹ y 400 kg de N ha año⁻¹ (López y Espinosa, 1995).

Café (*Coffea Arabica* L.) Se trata de un arbusto originario de Etiopía, el cafeto es una planta perenne y se considera que alcanza sus valores máximos de crecimiento y productividad entre los 6 y 8 años, después la planta se deteriora paulatinamente y su productividad disminuye a niveles de poca rentabilidad (Arcila, 2007). El género *Coffea*, consta de 25 a 40 especies en Asia y África tropicales; pertenece a la familia *Rubiaceae*. Hay cuatro especies principales, que se cultivan ampliamente y constituyen los cafés del comercio: café arábigo (*C. arabica* L.), café robusta (*C. canephora* Pierre ex Froehner), café liberiano (*C. liberica* Mull ex Hiern), y café excelso (*C. excelsa* A. Chev.).

En Colombia el área sembrada en este cultivo está alrededor de las 974000 ha, de las cuales 19908 hectáreas están en el departamento del Magdalena, en donde 7214 ha se encuentran sembradas en variedad Caturra, 1856 ha en variedad Colombia, 8199 ha en variedad Típica, 2635 ha en variedad castillo y variedad Tabi 4 ha; La producción registrada de café de Colombia, primer productor mundial de café arábigo suave lavado, superó los 10,3 millones de sacos de 60 kilos durante los últimos doce meses, (octubre 2012- octubre 2013) resultado del programa de renovación que busca elevar la productividad y la sanidad vegetal de los cafetales (FEDECAFE, 2013). Por la condición climática (mono-modal) el departamento de Magdalena cuenta con una única cosecha al año, la cual ocurre entre los meses de octubre y marzo. La caficultura de este departamento, se caracteriza por estar sembrada bajo árboles de sombrío con densidades promedios de 4850 plantas por hectárea, tecnología apropiada a la condición climática monomodal (un período seco de enero a abril) que concentra la cosecha entre los meses de octubre y febrero. La producción cafetera del Magdalena presenta granos de gran tamaño, gracias a la presencia constante de lluvias entre la floración y la maduración de los frutos, lo que favorece el mayor precio transferido a los caficultores.

El café de Colombia se cultiva en lugares de topografía ondulada entre los 600 y 1700 m de altitud sobre el nivel del mar (propia de la Sierra Nevada de Santa Marta), con una precipitación que varía desde los 1500 mm anuales hasta 2500 mm, y los volúmenes anuales

de evaporación son inferiores a 1200 mm, en diferentes investigaciones se ha encontrado que la temperatura óptima para el crecimiento del café está entre 19 y 22 °C. El café prospera en un suelo profundo, textura franca y bien drenado. La reacción del suelo debe ser más bien ácida, en Colombia el cafeto crece en suelos con pH entre 5 y 6,5; los rangos esenciales de nutrimentos en el suelo para el normal desarrollo del café son: Fósforo 6-14 ppm, Potasio 0,4 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Calcio 2,4 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Magnesio 0,8 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Boro 0,2 ppm, Zinc y Cobre 1 ppm, Hierro 100 ppm y Manganeso 50 ppm. (Arcila , 2007)

Hortalizas y Frutales: en Colombia se cultivan más de 35 especies hortícolas, en todos los pisos térmicos, las cuales ocupan alrededor de 108392 hectáreas, con una producción estimada de 1614123 toneladas. Si se tiene en cuenta que este tipo de explotaciones utiliza alrededor de cuatro jornales por hectárea, en promedio, se genera un empleo en el campo de aproximadamente 435000 jornales por año. En el departamento del Magdalena, con 5972 hectáreas en 12 especies frutícolas, representa el 2,7% del área nacional con frutales en producción; el área mayor corresponde a naranja, seguida por mango y coco. El rendimiento promedio por hectárea del departamento es de 13,9 toneladas, por debajo del promedio nacional de 17 toneladas por hectárea. Excluyendo el banano y el plátano, la tradición frutícola del Magdalena ha girado alrededor de los cítricos, el mango, el coco, la papaya y el maracuyá. De acuerdo con los datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, MADR, el melón que se ha llegado a exportar no aparece en los años 2003 y 2004 porque es una especie transitoria que entra y sale de acuerdo con la tendencia del mercado. Sin embargo, en el Magdalena la siembra del melón y la patilla depende del clima en cuanto a la presencia de lluvias en la época seca, que es la propicia para su cultivo. (Plan frutícola Nacional, 2006)

3. El Carbono Orgánico en los suelos

Los contenidos de materia orgánica más bajos < 1% se presentan en los suelos de la media y alta Guajira, en buena parte Aridisoles, y los más altos > 5% se encuentran en los Andisoles de los pisos climáticos fríos (Jaramillo, Parra y González, 1994). Los aspectos ambientales de la Región Caribe asociados a las zonas de vida, generan limitados aportes de biomasa que repercuten en el contenido de materia orgánica de los suelos; en éste predominan los valores bajos (45% de los suelos) medianos (el 30% de los suelos), muy bajos (20% de los suelos), mientras que los suelos con porcentajes altos de carbón orgánico sólo incluyen el 5% de la región (

Tabla 4).

Malagón y Correa (2005) en su artículo denominado los Suelos y el Cambio Climático global-Caso Colombia llegaron a las siguientes conclusiones en relación al Carbono Orgánico en los suelos de Colombia:

“El total de C.O. almacenado en los Suelos de Colombia fluctúa entre 7,3 y 14,7 Gt, de acuerdo con los rangos establecidos para evaluar su contenido en función de su densidad aparente. Su referencia es para los primeros 50 cm del suelo, sin considerar la capa de hojarasca (horizonte O de los suelos), especialmente importante en los ecosistemas boscosos de la Amazonía y la región del Pacífico. Es indudable que esta apreciación es incompleta, se recomienda complementarla mediante la actualización de datos, generar los requeridos para incluir profundidades mayores y la evaluación de la hojarasca.

“En apreciación de las cantidades de C.O. en los suelos colombianos los rangos mayores corresponde a contenidos medianos y bajos (1 a 2,5 de C.O%) en el 56,7% del territorio. Los evaluados como altos y muy altos alcanzan 10.1% y los muy bajos y extremadamente bajos (1 a menos de 0,5 de C.O.%) el 32,9%. En síntesis el 68,7% del país presenta suelos con valores bajos de C.O. y solo el 10,1% llega a valores altos.”

En un estudio preliminar realizado por Vásquez y Macías (2001), quienes trabajando en suelos de cultivo y bosques secundarios del departamento del Magdalena encontraron que la acumulación media de Carbono total fue de 33,8 ton C ha⁻¹ a 20 cm para suelos de cultivo y de 42,4 ton C ha⁻¹ a 20 cm para suelos de bosques. Los contenidos de Carbono total, oscilaron entre 0,7% y 2%, con valores medios de 1,3% para los suelos de cultivo y de 1,7% para los suelos de bosques; en relación a la altitud no se presentan diferencias considerables.

Tabla 3. Carbono Orgánico en suelos de Colombia según el clima.

Apreciación	% de C.O. según el clima		
	Frio	Medio	Cálido
Bajo	< 3,0	< 1,5	< 1,0
Medio	3,0 - 6	1,5 - 3,0	1,0 - 2,0
Alto	> 6	> 3,0	> 2,0

Fuente: IGAC (1995).

Tabla 4. Carbono Orgánico en Suelos de La Región Caribe.

Distribución del C.O. En Los Suelos de la Región Caribe				
% de C.O.	< 0,5	0,5 - 1,2	1,3 - 2,5	> 2,5
Distribución	45%	30%	20%	5%

Fuente: Malagón (2001).

Todo ello justifica la necesidad e importancia del objetivo prioritario de esta tesis: Conocer el contenido, formas y distribución de C así como su variación con los diferentes edafoclimas y tipos de suelos y usos.

4. Factores de formación de los suelos del departamento del Magdalena³

“El departamento del Magdalena (Figura 6) está situado en el extremo norte de Colombia, limita por su extremo sur-occidental con el río Magdalena; hace parte de la región del Caribe y está enmarcado dentro de las siguientes coordenadas: 08° 54' 59'' y 11° 20' 58'' de latitud norte, y 73° 32' 32'' y 74° 56' 51'' de longitud oeste.”

Como unidad político-administrativa tiene una extensión de 23188 km² que representan aproximadamente el 2% del territorio nacional y el 15% del área de la región Caribe colombiana, incluyendo cuerpos de agua (ríos, ciénagas y embalses). En este departamento se presentan cinco tipos de paisajes: el montañoso, correspondiente a la Sierra Nevada de Santa Marta, situado a orillas del mar caribe, sus cumbres se elevan considerablemente hasta los 5775 msnm en los picos Simón Bolívar y Colón, dando como resultado la presencia de todos los pisos térmicos, diversidad de especies de flora y fauna y abundancia de agua; el lomerío, con lomas y colinas de poca altura; el piedemonte, ubicado en la base de la Sierra Nevada en el sector occidental; la planicie, compuesta por terrazas y planos inundables, hace parte principalmente de la zona de influencia del río Magdalena y el valle, ubicado al sureste del departamento en la zona de influencia del río Ariguaní.

³ Tomado de Estudio General de Suelos. IGAC 2009





Figura 6. Localización geográfica del departamento del Magdalena en Colombia. Fuente: IGAC (2009).

4.1. Geología

Para una mayor comprensión y facilidad, se dividió el departamento en dos regiones geológicas: Región Sierra Nevada de Santa Marta y Región Megacuenca de Sedimentación. La complejidad geológica y muchos rasgos poco comunes del Macizo de la Sierra Nevada resultan de su ubicación en la intersección de varias fallas regionales con la esquina N-W de Suramérica durante el Mesozoico y el Terciario. Se configura entonces un macizo aislado, triangular, de 5700 m de altura, limitado por fallas, rodeado por cuencas terciarias, que consiste en tres provincias geotectónicas que han sido el resultado de tres orogénesis y de por lo menos tres periodos de fallamiento transcurrente a lo largo de fallas de dirección N70°E, N50°E, N15°W y E-W. Presentan basamentos metamórficos de edades diferentes y más de la mitad del Macizo consiste en rocas intrusivas (Figura 7).

La Provincia geotectónica de la Sierra Nevada tiene un basamento de granulitas del Precámbrico y representan un fragmento de la parte noroccidental del escudo de Guayana. Constituye un cratón anómalo, limitado por fallas y no fue metamorfoseado después del Precámbrico. Sin embargo, el basamento granítico fue fragmentado en dovelas de distensión por la intrusión de cuatro cuerpos de rocas ígneas. El tercio N-W del macizo consiste de dos franjas orogénicas paralelas de dirección N-E formadas en el Pérmico y el Triásico (Provincia de Sevilla) y del Jurásico Medio al Cretáceo Superior (Provincia de Santa Marta). Consisten en segmentos de rocas metamórficas desplazados con dirección N70°E, formados como acreciones en zonas de subducción en la periferia del Escudo de Guayana, pero que han sido deformados por fallamiento transcurrente y deslizamiento de gravedad subsecuentes.

El alineamiento arqueado de Sevilla, de rumbo N-E, es un segmento de una geosutura regional principal que separa cinturones metamórficos del Fanerozoico de la Provincia de la Sierra Nevada. Probablemente marca la superficie de una zona de subducción del Pérmico Superior y Triásico, a lo largo de la cual se desarrollaron la franja metamórfica de Sevilla, compuesta de neises máficos y algunos esquistos y las rocas ígneas del Triásico. Controló la generación y el emplazamiento de dos series características de magmas que formaron franjas paralelas de metadioritas del Pérmico, plutones sintectónicos del Triásico y, finalmente, dos franjas paralelas postmetamórficas contemporáneas de batolitos del Jurásico Medio que intruyeron al cratón antiguo y causaron su dislocación por fallas de distensión, de rumbo N15°E y movimientos sinintrusivos de dirección N70°E a lo largo de fallas preexistentes. De esta manera, el alineamiento de Sevilla controló la evolución geológica de las tres provincias del Macizo, desde el Pérmico al Paleoceno. Separa provincias de muy diferentes basamentos

ígneo-metamórficos y estilos tectónicos. Igualmente, controló la intrusión de plutones o batolitos del Pérmico, Triásico, Jurásico, Cretáceo Inferior, Paleoceno y Eoceno Medio, o bien, forma un contacto fallado con ellos. El forma la pared occidental de una ancha y compleja zona de falla, de rumbo N-E, que fue sucesivamente intruida por metadioritas y plutones sintectónicos a lo largo de la parte sur en varias etapas durante el Triásico, después de la orogénesis de Sevilla. Estas franjas fueron separadas por más de 20 km por la intrusión del batolito de Aracataca.

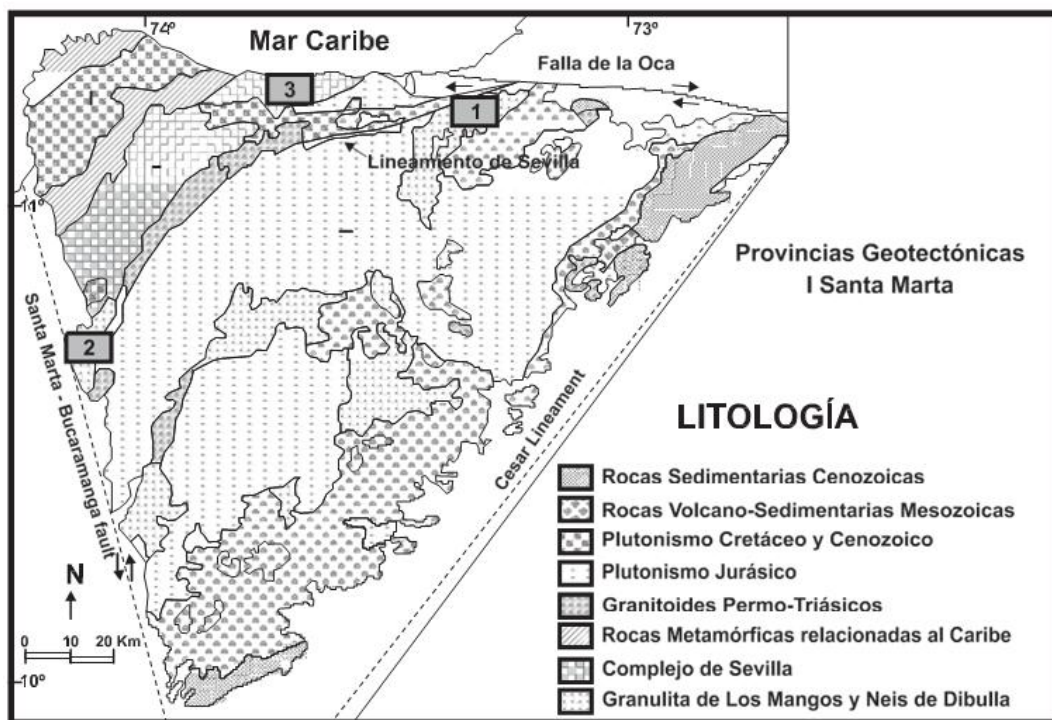


Figura 7. Provincias Geotectónicas del Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta, (1) Provincia Geotectónica de la Sierra Nevada (2) Provincia Geotectónica de Sevilla y 3) Provincia Geotectónica de Santa Marta, modificado de Tschanz and others, 1969. Fuente: IGAC (2009) Estudios de Suelos del Magdalena

La franja central de batolitos del Jurásico Medio consiste en los batolitos Central, de Aracataca, Bolívar y de Atanques, la cuarzomonzonita de Ojeda y el complejo plutónico de Tucurinca y separa la pared occidental no deformada de la zona fallada de Sevilla de la distendida y deformada pared oriental que consiste de tres bloques de granulitas. La franja suroriental consiste de los batolitos de Pueblo Bello y Patillal, del Jurásico Medio, los cuales presentan un techo esencialmente contemporáneo de ignimbritas del Jurásico.

El alineamiento de Sevilla se interpreta como una zona de subducción durante la orogénesis de Sevilla, que posiblemente fue reactivada y tuvo gran movimiento transcurrente

durante la orogénesis de Santa Marta. La Provincia de Sevilla consiste de un basamento de posible corteza oceánica, el Neis Buritaca (anfíbolitas), esquistos y neises no diferenciados suprayacentes. Está intruida por plutones del Paleoceno y el Eoceno, incluyendo al estructuralmente controlado Plutón de Buriticá, de dirección E-W y está principalmente limitada por metadioritas del Pérmico que fueron intruidas y posteriormente desplazadas a lo largo del alineamiento de Sevilla.

La Provincia geotectónica de Santa Marta está constituida por el batolito de igual nombre, de dirección N-E y dos franjas metamórficas paralelas, de igual rumbo. La franja exterior de esquistos verdes (Grupo Taganga) constituida por placas falladas de rocas polimórficas no comunes que fueron metamorfoseadas a la facies esquistos verde durante el Cretáceo Medio y el Paleoceno. La franja inferior consiste de esquistos de grado anfíbolita del Grupo Gaira, los cuales fueron metamorfoseados durante el Jurásico e intruidos por el Batolito de Santa Marta de dirección N-E y por pequeños cuerpos durante el Eoceno Medio, después del último metamorfismo regional. La franja metamórfica de Santa Marta se formó probablemente a lo largo de una zona de subducción que fue paralela a la más antigua franja de Sevilla, en respuesta a los mismos procesos subcorticales de larga duración, pero siguiendo una reorganización del antiguo sistema que deformó la Provincia de la Sierra Nevada. El alineamiento de Sevilla fue reactivado en el Jurásico y el Cretáceo, cuando rocas intrusivas que, probablemente, representan magmas a lo largo de una zona de subducción compleja durante la orogénesis de Santa Marta fueron emplazadas a lo largo de ella. Las rocas sedimentarias y volcánicas están confinadas al antiguo cratón. Las granulitas de la Provincia de la Sierra Nevada están localmente cubiertas por remanentes de rocas sedimentarias del Devónico y del Pensilvaniano. Las capas rojas del Mesozoico están presentes como espilitas rojas, rocas piroclásticas y limolita volcanogénica del Triásico. Este gran mosaico estructural complejo se formó por los procesos anteriormente descritos y por un muy grande fallamiento transcurrente en el alineamiento de dirección E-W de Oca y el sistema de rumbo N15°W del alineamiento Santa Marta – Bucaramanga, en los bordes N y W del Macizo de la Sierra Nevada. La magnitud del desplazamiento lateral, después del último metamorfismo regional del Cretáceo Superior, está indicada por las rocas metamórficas sepultadas debajo de la cuenca adyacente del Bajo Magdalena. Las tres series metamórficas fueron desplazadas unos 105 km lateralmente hacia la izquierda en el alineamiento Santa Marta – Bucaramanga, el grupo Gaira por lo menos 62 km lateralmente hacia la derecha en el alineamiento de Oca,

probablemente durante el Paleoceno o el Eoceno. Todo el Macizo se movió hacia el N-W, desde su posición original, como resultado de este desplazamiento.

Las evidencias muestran que el macizo de la Sierra Nevada fue levantado en dos o más etapas que comenzaron en el Mioceno Inferior por desplazamientos verticales sobre fallas nuevas y segmentos reactivados de los alineamientos de Oca y Santa Marta-Bucaramanga. Fue erodado a una penillanura, cerca del nivel del mar durante el Mioceno Superior, después del primer período de levantamiento del Terciario y levantado posteriormente, de nuevo, en varios bloques durante el Terciario Superior. En este tiempo, la Provincia de la Sierra Nevada fue ladeada hacia el S-E y la de Santa Marta lo fue hacia el N-W.

4.2. Geomorfología

El departamento del Magdalena se localiza en la región norte de Colombia y su relieve resulta de la complejidad geológica, de rasgos poco comunes y de la evolución tectónica que ha ocurrido en esta región, a lo largo de cientos de millones de años. Se encuentra conformado por dos geoestructuras denominadas Cordillera y Megacuena de sedimentación. En la (Figura 9) se observa la Cordillera hacia el NE y la Megacuena corresponde a la parte adyacente al W (lomeríos bajos y planicies), que constituye el resto del departamento. La Cordillera está constituida por un gran macizo rocoso que se encuentra aislado del sistema montañoso andino, denominado Sierra Nevada de Santa Marta y está localizado en la parte N-E del departamento. Se caracteriza por presentar un ambiente predominantemente estructural, pues este complejo triangular es la consecuencia de tres orogénesis y de su ubicación en la intersección de tres principales fallas regionales (Falla Santa Marta Bucaramanga, Falla de la Oca y el Lineamiento Cesar) con la esquina N-W de Suramérica durante el Mesozoico y el Terciario. Suplementariamente se observan procesos erosivos que le otorgan una influencia denudativa, inherente al levantamiento de este gran sistema montañoso y a los procesos de incisión propios de la red de drenaje. Presenta un área de 5625 km², que equivale al 23,94% del territorio departamental.

La segunda geoestructura corresponde a la Megacuena de sedimentación ubicada al occidente y suroccidente de la Sierra Nevada de Santa Marta y se extiende hasta el río Magdalena, cubriendo 17870 km², lo que equivale al 76% del territorio departamental. En esta zona se diferencian dos grandes unidades: una región central de 8776 km² (37%), que comprende todo el sistema de lomeríos, incluyendo el piedemonte y una región de extensas

planicies que cubren un área de 6800 km² (29%) que se encuentran ubicadas al occidente y al norte del departamento; el resto del territorio lo conforman los cuerpos de agua y los centros urbanos.

En la primera región se encuentran dos importantes cuencas: la Cuenca de la ladera suroccidental de la Sierra Nevada, con drenajes provenientes del macizo como los ríos Fundación, Aracataca y Tucurínca, que desembocan en la ciénaga Grande de Santa Marta y la cuenca del río Ariguaní, que drena las aguas que corren hacia el oriente desembocando fuera del área de estudio, en el río Cesar; en la segunda región domina la cuenca del río Magdalena, la cual incluye los drenajes del occidente que desembocan en dicho río; son frecuentes las ciénagas, lagos y lagunas en este sector. La megacuenca está conformada por rocas sedimentarias continentales y marinas del Paleógeno-Neógeno y por extensos depósitos del Cuaternario, de origen aluvial y fluviolacustre principalmente. Se encuentran dos áreas deformacionales localizadas en el valle inferior del Magdalena (sistemas de fallamiento con orientación NE y NW) y plegamientos que originan sinclinales amplios y anticlinales estrechos de dirección NE, principalmente.

Esta megacuenca de sedimentación está directamente asociada a los procesos de depositación continental, marina y transicional que se extiende a lo largo del valle inferior del Magdalena y de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta; se encuentra condicionada tanto por la red hídrica que tributa sus aguas al mar Caribe, con una marcada erosión fluvial y por procesos de agradación asociados a la dinámica costera.

4.3. Paisajes y tipos de relieves

De acuerdo con la metodología de Zinck (1987), en el departamento del Magdalena existen cinco tipos de paisajes distribuidos dentro de las dos grandes geoestructuras, evidenciando la gran diversidad geomorfológica de la región. En la Cordillera se encuentra solamente el paisaje montaña que representa el 23,94% del departamento, mientras que en la Megacuenca de sedimentación se presenta la mayor variedad de paisajes, donde el paisaje de Lomerío representa el 36,09% del departamento, seguido por el paisaje de Planicies con un 24,59%, los Valles con un 4,37% y el Piedemonte con tan solo el 1,26% (Figura 8).

4.3.1 Paisajes de montaña

Se define como montaña a una gran elevación natural del terreno, de diverso origen, con más de 300 metros de desnivel, cuya cima puede ser aguda, subaguda, semirredondeada, redondeada o tabular y las laderas de formas regulares, irregulares o complejas presentan un declive promedio superior al 30% (IGAC, 2005).

En el departamento del Magdalena estas condiciones se presentan al oriente, en el macizo aislado de la Sierra Nevada de Santa Marta, que se eleva desde el nivel del mar hasta los 5775 m en sus picos nevados (Simón Bolívar y Cristóbal Colón). Aparte de configurar la montaña con mayor elevación en Colombia, otro rasgo particular que la hace única en el mundo es su posición geográfica, pues es la formación montañosa litoral de mayor altitud en el mundo. Este paisaje de montaña se extiende en un área de 5625.10 km² que corresponden al 23,94% del departamento. En términos generales se caracteriza por presentar una topografía abrupta, con pendientes fuertes (mayores del 12%), con cuchillas de dirección SW-NE que se encuentran separadas por valles paralelos y en forma de V (Ingeominas, 2003).

Esta gran unidad de montaña es el resultado de una compleja mezcla de procesos relacionados con la tectodinámica (procesos endógenos) y ha sido originada en principio por fenómenos orogénicos (levantamientos y/o hundimientos de la cordillera, plegamientos y/o fallamientos), por la intensa actividad tectónica y magmática, además del volcanismo. Posteriormente, a estos ciclos de formación, la montaña ha estado expuesta por un extenso período de tiempo a los procesos exógenos (degradacionales), como la meteorización, la erosión y en menor proporción la sedimentación que, junto con los procesos endógenos, son los responsables del modelado actual de la montaña. Teniendo en cuenta estas características, al paisaje de montaña del departamento del Magdalena se le asigna un atributo de paisaje relacionado predominantemente con su génesis: fallado, pues estas estructuras han determinado su evolución.

Tipos de relieve: En la unidad de paisaje de Montaña se encuentran 5 tipos de relieves (Tabla 5) donde predominan las “Filas y Vigas” y las “Lomas y Colinas” de acuerdo a su extensión, 71,85 y 24%, respectivamente. Los otros tres tipos de relieves: las Lomas, los Campos Morrénicos y los Vallecitos cubren tan solo el 8,26% del paisaje y se encuentran distribuidos de manera dispersa en la unidad. A continuación se describe cada uno de los tipos de relieve.



Figura 8. Mapa físico del departamento Del Magdalena. Fuente: OCHA - United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs.

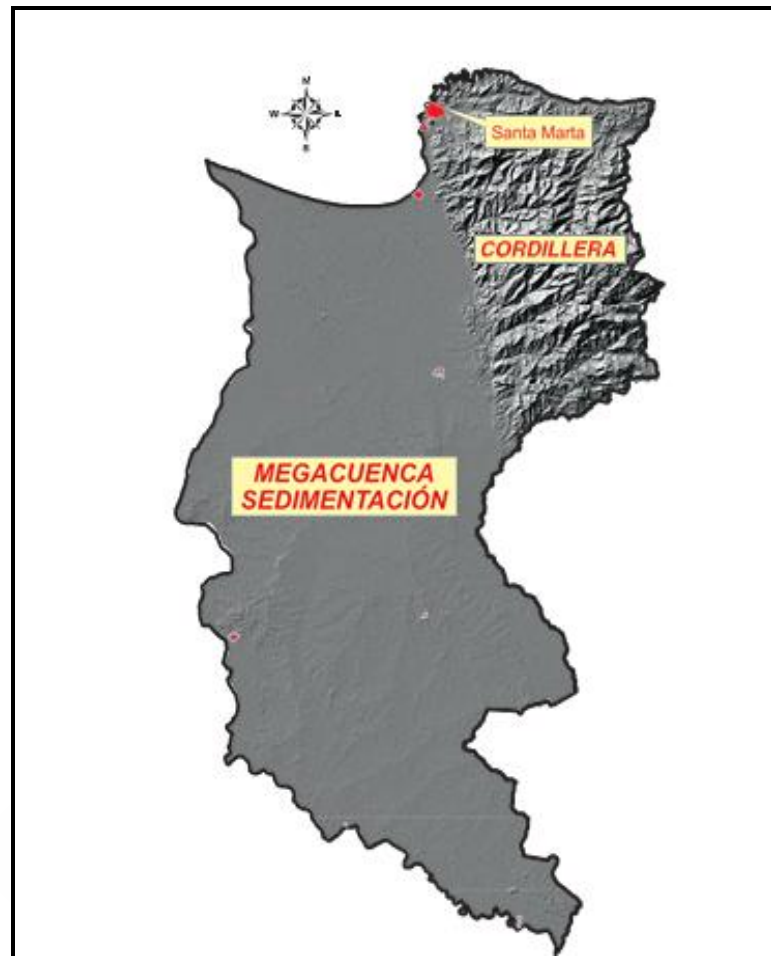


Figura 9. Modelo digital de elevación del departamento del Magdalena, en donde se observan las dos geoestructuras: Cordillera y Megacuena de sedimentación. Fuente: IGAC. (2009). Estudio de Suelos del Magdalena 73p.

- **Filas y Vigas:** localizadas entre 100 y 4400 msnm con una altura relativa que varía desde 500 hasta más de 1000 m. Su inclinación general es superior al 75%, con longitudes que varían entre 50 y 100 m de longitud, formas rectas, cimas agudas y valles en forma de “V”.. Presenta un patrón de drenaje de tipo trellis de fallas con una densidad alta y su grado de disección es moderado.

- **Lomas y Colinas:** localizadas entre 0 y 1000 msnm con una altura relativa que varía promedio de 50 y 200 m. Su inclinación general varía entre el 25 y el 50%, con 50 a 100 m de longitud, de formas complejas, cimas redondeada y valles en forma de “V”. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad alta y su grado de disección es moderado.

- **Lomas:** algunas localizadas desde 500 hasta 1400 msnm y otras con un rango más amplio que va desde los 300 hasta los 1100 msnm. Se encuentran igualmente dos alturas relativas en función de su ubicación: entre 50 a 200 m y entre 200 a 500 m. La inclinación general de las laderas varía entre el 25 y el 50%, con 50 a 100 m de longitud, de formas complejas, cimas redondeadas y valles entre lomas en forma de “V”. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad alta y su grado de disección es moderado.

- **Campo Morrénico:** localizadas a alturas superiores a los 3000 msnm con una altura relativa que varía en promedio de 50 a 200 m. Su inclinación general varía entre el 12 y el 25%, con 50 a 100 m de longitud, formas cóncavas, cimas redondeadas y valles en forma de “U”. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad alta y su grado de disección es moderado.

- **Vallecito:** se ubican a cualquier altura, con una elevación relativa menor de 50 m. Su inclinación general varía entre el 3 y el 7%, con una longitud menor a 50 m, formas rectas y valles en forma de “V” abierta. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad media y su grado de disección es ligero.

Tabla 5. Unidades de paisaje y tipos de relieve del departamento del Magdalena

Paisajes	Tipos de Relieves (TR)	área (km ²)	% TR en el paisaje	% Paisaje con respecto al área departamental
MONTAÑA	Filas y Vigas	4041,81	71,85	23,94
	Lomas y Colinas	1350,06	24,00	
	Lomas	174,26	3,10	
	Campos Morrénicos	40,05	0,71	
	Vallecitos	18,92	0,34	
	TOTAL	5625,10	100	
LOMERIO	Lomas y Ondulaciones	4087,26	48,20	36,09
	Lomas	1838,01	21,68	
	Lomas y Colinas	1552,59	18,31	
	Vallecitos	917,19	10,82	
	Glacis de Erosión-Pedimento	84,04	0,99	
	TOTAL	8479,09	100	
PLANICIE	Plano de inundación	2597,30	44,96	24,59
	Terrazas	1917,30	33,19	
	Planos de mareas	859,68	14,88	
	Terrazas antiguas	400,57	6,93	
	Terrazas Marinas	2,10	0,04	
	TOTAL	5776,95	100	
VALLE	Terrazas	593,71	57,77	4,37

Paisajes	Tipos de Relieves (TR)	área (km ²)	% TR en el paisaje	% Paisaje con respecto al área departamental
	Planos de inundación	433,93	42,23	
	TOTAL	1027,64	100,00	
PIDEMONTE	Abanicos-terrazza	261,43	87,98	1,26
	Vallecitos	33,56	11,29	
	Abanicos de Explayamiento	2,16	0,73	
	TOTAL	297,15	100	

Fuente: IGAC. Estudios de Suelos de Magdalena (2009).

4.3.2 Paisaje de lomerío

Se define como un paisaje de Lomerío a las elevaciones naturales del terreno de menor desnivel que una montaña (menos de 300 m), cuyas laderas presentan una inclinación promedio entre el 7 y el 12% aunque pueden alcanzar hasta el 50% y divergen en dos o más direcciones a partir de una cima estrecha o amplia (IGAC, 2005), conformando así una secuencia de bases, laderas y cimas que pueden tener diferentes formas definidas por la litología, las estructuras, el clima y la red hídrica, entre otros.

En el departamento del Magdalena, es el paisaje de mayor extensión, con un área de 8979,09 km² que equivale al 36,09% del territorio, está constituido por un gran bloque ancho y dispuesto en sentido este-oeste, localizado sobre el área del valle inferior del Magdalena, en el que ocupa principalmente toda la franja central y centro occidental del territorio y algunos sistemas de lomeríos aislados, al sur del departamento. Está limitado tanto al norte como al sur por los paisajes de planicie, al occidente por el río Magdalena y al oriente (de norte a sur) por las estribaciones suroccidentales de la Sierra Nevada de Santa Marta, el valle del río Ariguaní y el departamento del Cesar.

Tipos de relieve: En esta unidad de paisaje se encuentran cinco tipos de relieve (Tabla 5) entre los cuales predominan las lomas y ondulaciones, presentes en un 48,20%, seguido por las lomas (21,68%), las lomas y colinas (18,31%), los vallecitos (10,82%) y en una mínima proporción los glacis de erosión (1%). A continuación se describen cada uno de los tipos de relieve:

- **Lomas y ondulaciones:** localizadas hasta los 100 msnm, con una altura relativa menor de 50 m. Su inclinación general varía entre el 7 y el 12%, con longitud inferiores a 50 m, formas convexas, cimas planas a redondeadas y valles abiertos poco profundos. Presenta

un patrón de drenaje de tipo dendrítico y subdendrítico con una densidad media y su grado de disección es ligero.

- **Lomas:** se encuentran aproximadamente desde 60 hasta 220 msnm, con una altura relativa que varía según su ubicación, una menor a 50 m y otra en cercanías de la cuenca del Ariguaní de 50 a 200 m. Su inclinación general varía entre el 12 y el 25%, con una longitud, menor a 50 m, formas convexas, cimas redondeadas y valles poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subdendrítico a dendrítico con una densidad alta a media y su grado de disección es moderado.

- **Lomas y colinas:** localizadas entre los 25 y 200 msnm con una altura relativa menor a 50 m. Su inclinación general varía entre el 7 y el 12%, con una longitud inferior a 50 m, formas convexas, cimas planas y redondeadas y valles abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad media a baja y su grado de disección es moderado.

- **Vallecitos:** localizados entre 20 y 150 msnm con una altura relativa inferior a 50 m. Su inclinación general varía entre el 0 y el 3%, con 50 a 100 m de amplitud, formas rectas, valles abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subparalelo a dendrítico con una densidad media y su grado de disección es ligero.

- **Glacis de erosión-pedimento:** localizado entre 80 y 150 msnm aproximadamente, con una altura relativa menor a 50 m. Su inclinación general varía entre el 3 y el 7%, con 50 a 100 m de longitud, formas rectas, cimas planas y valles poco abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

4.3.3 Paisaje de planicie

El paisaje de planicie es una geoforma de tipo agradacional caracterizada por ser una zona amplia y plana, ligeramente ondulada con pendientes menores al 3%; corresponde a los diferentes aportes de origen aluvial, marino o eólico.

En el departamento del Magdalena este paisaje ocupa el 24.59% del total del territorio y se localiza en el denominado Valle Inferior del Magdalena. La Planicie está distribuida en

dos regiones principales: la primera y de mayor extensión se localiza al norte del departamento e incluye todo el sistema de ciénagas, lagos y pantanos, entre las cuales se destaca la ciénaga Grande de Santa Marta; al sur limita con el paisaje de lomerío y se extiende hasta el mar Caribe al norte; al occidente con el río Magdalena y al oriente con el piedemonte de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Tipos de relieve: En esta unidad de paisaje se encuentran cinco tipos de relieve (Tabla 5) entre los cuales predominan los planos de inundación y las terrazas, presentes en un 44,96 y 33.19%, respectivamente, seguido por los planos de marea (14,88%), las terrazas antiguas (6,93%) y en menor proporción las terrazas marinas (0,04%). A continuación se describen cada uno de los tipos de relieve:

- **Plano de inundación:** se localizan entre 0 y 50 msnm, con una inclinación inferior al 3%, de grandes extensiones (de kilómetros), formas planas a plano - cóncavas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

- **Terrazas:** se localizan entre 0 y 75 msnm, con una inclinación que no supera el 3%, longitudes mayores a 300 m, formas rectas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subparalelo a dendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

- **Plano de marea:** localizados a menos de 25 msnm, con una inclinación inferior al 3%, de grandes extensiones (de kilómetros), formas cóncavas y rectas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subparalelo con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

- **Terraza antigua:** localizada hasta los 50 msnm. Su inclinación no supera el 3%, con longitudes superiores a 1000 m, formas rectas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

- **Terraza marina:** localizada a menos de 25 msnm. Su inclinación no supera el 3%, con cerca de 1000 m de amplitud, formas rectas, cimas y valles abiertos poco profundos. Presenta un grado de disección ligero.

4.3.4 Paisaje de valle

Corresponde a una porción de terreno relativamente plana, comprendida entre dos áreas de relieve más alto y generalmente drenada por un río; predomina la sedimentación longitudinal pero se admiten aportes laterales locales traídos por la red hídrica tributaria (modificado IGAC, 2005).

El departamento es bañado por las aguas del río Magdalena y en un sentido amplio esta zona corresponde fisiográficamente al Valle Inferior del Magdalena. Sin embargo, de acuerdo con la clasificación de Zink (1987), esta zona ha sido denominada como Planicie y se excluye del paisaje de Valle, debido a que en la parte final del trayecto, sus aguas no se encuentran confinadas y los sedimentos se esplayan a lo largo de grandes extensiones.

De acuerdo con lo anterior, el paisaje de Valle está presente en el costado oriental del departamento y está conformado por la cuenca del río Ariguaní, el cual desemboca en el río Cesar (fuera del departamento) y este, a su vez, en el río Magdalena a través de la Ciénaga de Zapatos; se destacan los arroyos La Unión, Argelia y La India.

Este paisaje ocupa tan solo el 4,37% del área total del territorio y en el departamento cubre solamente la margen derecha de la cuenca del río Ariguaní, siendo su curso el límite departamental entre Magdalena y Cesar. Esta cuenca es considerada como una fosa de sedimentación activa y se caracteriza por presentar una topografía bastante suave.

Tipos de relieve: Dentro de esta unidad de paisaje se encuentran dos tipos de relieve (Tabla 5): un sistema de Terrazas que ocupa el 57,77% de los valles y los Planos de inundación que corresponden al 42,23% restante. Ambos tipos de relieve configuran franjas alargadas y estrechas que siguen el rumbo de la corriente NS. En seguida se describen cada uno de los tipos de relieve:

- **Terrazas:** localizadas entre los 50 y 125 msnm, con una altura relativa inferior a 50 m. Su inclinación general varía entre el 0 y el 3%, con longitudes mayores a 1000 m, formas rectas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subdendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligera.

- **Plano de inundación:** localizados a menos de 100 msnm con una altura relativa inferior a 50 m. Su inclinación general varía entre el 0 y el 3%, con una amplitud variable entre 1 y 10 km y 60 km de longitud. Presenta formas cóncavas y un patrón de drenaje de tipo dendrítico a irregular con una densidad baja y su grado de disección es nulo.

4.3.5 Paisaje de Piedemonte

Unidad genética correspondiente al área que se extiende al pie de los sistemas montañosos, las serranías y los lomeríos. Ha sido formada por la sedimentación de materiales transportados desde los terrenos más elevados hacia las zonas más bajas y abiertas; corresponde a superficies planas de suave inclinación con pendientes entre el 3 y el 12%.

Este piedemonte es la unidad de paisaje de menor extensión en el departamento, con tan solo 297,15 km², que equivale al 1,26% del territorio. De acuerdo a su génesis, los depósitos son del tipo coluvio-aluvial.

Tipos de relieve: Esta unidad de paisaje cuenta con cuatro tipos de relieve (Tabla 5) entre los cuales predominan los Abanicos-terrazza Antiguos con el 76,23% del terreno, sobre los Abanicos-terrazza Recientes (11,75%), los Vallecitos (11,29%) y los Abanicos de Eh xplayamiento (0,73%). A continuación se describen cada uno de los tipos de relieve.

- **Abanicos-terrazza:** localizadas entre 25 y 125 msnm con una altura relativa inferior a 50 m. Su inclinación general varía entre 0 y 3%, con longitudes entre 100 y 300 m, de formas planas a convexas, vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dicotómica con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

- **Vallecitos:** localizados entre 25 y 125 msnm con una altura relativa inferior a 50 m. Presenta una inclinación general que no supera el 3%, amplitudes inferiores a 50 m, de formas rectas y sus cauces son abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo paralelo con una densidad baja y su grado de disección es moderado.

- **Abanicos de explayamiento:** localizados entre 20 y 50 msnm con una altura relativa que no supera los 50 m. La inclinación general varía entre 0 y 3%, con longitudes entre 50 y 100 m, de formas predominantemente planas a cóncavas y vallecitos abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dicotómica con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

4.4. Clima

El clima es uno de los factores formadores de los suelos debidos en gran medida a que define las cantidades y distribuciones de los diversos organismos, animales y vegetales, así como sus relaciones. El clima involucra una serie de condiciones atmosféricas que caracterizan una región donde los elementos más importantes son la precipitación y la temperatura; igualmente, tienen influencia otros elementos climáticos como la evaporación, la humedad, la velocidad y dirección del viento, la radiación, la luminosidad y la nubosidad.

Su análisis se realiza en función de sus elementos básicos: temperatura, viento, humedad, precipitación y otros, considerándolos aisladamente o combinados; los cuales conducen a parámetros tan importantes como la evapotranspiración y a los índices climáticos más o menos complejos, cuyos valores son utilizados como base para establecer tipos climáticos, siendo un componente importante en la zonificación climática. Colombia está localizada en la zona ecuatorial y el sistema montañoso está conformado principalmente por la cordillera de Los Andes que le confiere una variedad topográfica, donde se encuentran las selvas húmedas, las llanuras tropicales, los páramos y las nieves perpetuas. Por lo tanto, las variaciones climáticas no obedecen a estaciones, sino a las variaciones altitudinales, donde la temperatura desciende aproximadamente 6 °C, por cada 1000 metros que se ascienda; a nivel del mar, la temperatura está alrededor de los 30 °C.

Entre los factores que condicionan el clima tenemos la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), caracterizada por el Frente Intertropical, el efecto de la interacción Océano Pacífico - atmósfera (Corriente del Niño y Corriente Fría de Humboldt), los vientos alisios, la orografía y la posición geográfica en la zona ecuatorial ligada estrechamente con el factor radiación solar. De enero a mayo, la corriente de El Niño introduce al continente aire húmedo y caliente que produce lluvia convectiva. Si bien en Colombia no hay estaciones y el clima de cada región se mantiene relativamente estable durante todo el año, se presentan ligeras variaciones según sea época de temporada seca o de temporada de lluvias. La temporada seca suele ser en diciembre-enero y en julio-agosto y la de lluvias en abril-mayo y octubre-noviembre, aunque esto puede variar bastante.

El departamento de Magdalena, por su posición astronómica, está sujeto durante casi todo el año a la acción de los vientos alisios del noreste, de gran influencia en la

caracterización del clima y en el régimen de vida de la región; estos vientos hacen que la zona litoral tenga condiciones de aridez debido a que las nubes son transportadas hacia el suroeste y acumuladas sobre un costado de la Sierra Nevada de Santa Marta (Tabla 6).

En el departamento los pisos térmicos presentan características específicas y se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- **Piso térmico cálido:** De 0 a 1000 msnm con temperaturas medias anuales superiores a los 24 °C corresponde al 80% del área departamental y hacen parte de ella zonas como la depresión Momposina, Zona Bananera, Valle del río Ariguaní y Ciénaga Grande de Santa Marta. Posee una precipitación anual que oscila entre 1000 y 2000 mm.

- **Piso térmico templado:** de 1001 a 2000 msnm con temperaturas anuales que oscilan entre 18 °C y 24 °C. Se localiza en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. Presenta una precipitación anual entre 2000 y 4000 mm.

- **Piso térmico frío:** Entre los 2001 a 3000 msnm, posee temperaturas anuales que oscilan entre 12 °C y 18 °C; también se localiza en la Sierra Nevada de Santa Marta y tiene una precipitación anual entre 2000 y 4000 mm.

- **Piso térmico de páramo:** de los 3001 msnm en adelante, posee temperaturas inferiores a los 12 °C y es propio de la Sierra Nevada. Allí el promedio anual de precipitación se encuentra en los 1500 mm.

Capítulo 1. Suelos de Colombia

Tabla 6. Datos y zonificación climática departamento del Magdalena.

ESTACIÓN	msnm	N	E	Prec,	Temp,	ETP	Índice	Déficit	Exceso	Piso térmico	Clase de Humedad
Pueblo Viejo	2	1707,934	977,877	160,0	27,0	1741,4	10,9	1581,4	0,0	Cálido	Árido
Santa Marta	6	1735,585	985,176	170,0	27,0	1472,7	10,3	1572,7	0,0	Cálido	Árido
Ciénaga	3	1709,776	981,522	300,0	27,0	1741,4	5,8	1441,4	0,0	Cálido	Semi-Árido
1501505 Apto, Simón Bolívar (Santa Marta)	4	1720,836	983,349	500,5	28,1	2048,1	4,1	1547,5	0,0	Cálido	Semi-Árido
1501504 Univ Tec Magdalena (Santa Marta)	7	1733,740	986,995	663,4	27,9	1986,0	3,0	1322,6	0,0	Cálido	Muy Seco
1501502 La Ye (Ciénaga)	20	1707,930	985,164	733,1	28,5	2162,7	3,0	1429,6	0,0	Cálido	Muy Seco
Fundación	45	1654,465	988,789	1290,0	26,8	1699,7	1,3	436,5	26,8	Cálido	Seco
Aracataca	40	1663,684	986,968	1370,0	26,8	1699,7	1,2	430,3	100,6	Cálido	Seco
1501510 Parque Tayrona (Santa Marta)	30	1739,273	1017,934	1337,4	26,2	1585,4	1,2	435,2	187,2	Cálido	Seco

Fuente: IDEAM (2009).

Clasificación y zonificación climática

La clasificación climática tiene como fin establecer tipos (conjuntos homogéneos de condiciones climáticas) para poder definir las regiones según el clima; contempla aspectos básicos como temperatura, precipitación y evapotranspiración, considerándolos combinadamente. Para el desarrollo del presente estudio se aplicó la clasificación climática propuesta por el IGAC, Subdirección de Agrología, que integra la propuesta metodológica de Caldas, la cual contempla la variación altitudinal de la temperatura y la relación resultante de dividir la evaporación potencial (ETP) por la precipitación (P). A partir de esta propuesta metodológica y tomando como base el índice (ETP/P) que reporta un valor adimensional, se realizó la zonificación climática empleando el método geoestadístico Kriggin. En la (Tabla 7) se relacionan los factores básicos tenidos en cuenta para determinar la clasificación climática y su posterior zonificación (Figura 10).

• **Cálido Árido (c - A)**, unidad climática localizada al norte del departamento, en la zona litoral, donde están ubicadas las cabeceras municipales de Santa Marta y Pueblo Viejo; cubre un área aproximada de 148,56 km², que representa el 0,64% del área del departamento. Presenta las siguientes características (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 11):

- Altitud inferior a 100 msnm.
- Temperatura media anual (T) superior a los 27 °C.
- Evapotranspiración potencial anual (ETP) entre los 1740 a 1745 mm, con los mayores valores en los meses de mayo.
- Precipitación promedia multianual (P) entre 160 y 170 mm. Los períodos de lluvias corresponden a los meses de junio – julio y septiembre – noviembre.
- El déficit hídrico anual es de 1580 mm y está distribuido durante todos los meses del año.

• **Cálido Semi Árido (c - SA)**, unidad climática localizada al norte del departamento, colindando con la unidad (c - A), donde está ubicada la cabecera municipal de Ciénaga y la estación No. 1501505 del IDEAM; cubre un área aproximada de 1409,53 km², que representa el 6,08% del área del departamento. Presenta las siguientes características (Tabla 8 y Figura 12):

- Altitud inferior a 100 msnm.
- Temperatura media anual (T) entre los 27 °C – 28 °C.

- Evapotranspiración potencial anual (ETP) fluctuante entre 1740 y 2050 mm, siendo el mes de mayo el de mayor valor.
- Precipitación promedio multianual (P) entre 300 a 500 mm, con dos períodos de lluvias; el primero entre los meses de junio - julio y el segundo entre los meses de septiembre y octubre.
- El déficit hídrico anual varía entre los 1440 y 1550 mm y está distribuido durante todos los meses del año.

Tabla 7. Clima ambiental – según IGAC.

Carácter Térmico		Cálido		Templado	
		Altitud (msnm)	0-1000	Altitud (msnm)	1001-2000
		Temperatura (°C)	> 24 °C	Temperatura(°C)	24.0 °C -18.1 °C
		Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)	Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)
Carácter Húmedo	Árido	>8,0	<250		
	Semiárido	4,1 - 8.0	251 - 500		
	muy seco	2,1 - 4.0	501 - 1000	>2,0	<500
	Seco	1,1 - 2.0	1001 - 2000	1,1 – 1,0	501 - 1.000
	Húmedo	0,51 - 1.0	2001 - 4000	0,51 – 1,0	1001 - 2000
	muy húmedo	0,25 - 0.5	4001-8000	0,26-0,5	2001 - 4000
	Pluvial	0,125 – 0,25	>8000	0,125 – 0,25	>4000
Carácter Térmico		Frío		Muy Frío	
		Altitud (msnm)	2001 - 3000	Altitud (msnm)	3001 - 3.600
		Temperatura (°C)	18.0 °C - 12.1 °C	Temperatura (°C)	120 °C - 8.1 °C
		Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)	Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)
Carácter Húmedo	muy seco	>2.0	>500		
	Seco	1,1 – 2,0	501 - 1000	1,1 – 2,0	<500
	Húmedo	0,51 – 1,0	1001 - 2000	0,51 -1,0	501 – 1000
	muy húmedo	0,25 – 0,5	2001 - 4000	0,25 – 0,5	1001 – 2000
	Pluvial	0,125 – 0,25	> 4000	0,125 – 0,25	>2000
Carácter Térmico		Extremadamente Frío		Subnival	
		Altitud (msnm)	2001 - 3000	Altitud (msnm)	3001 – 3600
		Temperatura (°C)	18,0 °C – 12,1 °C	Temperatura(°C)	120 °C – 8,1 °C
		Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)	Índice (ETP/P)	Precipitación (mm)
Carácter Húmedo	Húmedo	0,51 – 1,0	501 - 1000		
	muy húmedo	0,25 – 0,5	1001 - 2000	0,26 – 0,5	250 – 500
	Pluvial	0,125 – 0,25	>2000	0,125 – 0,25	501 – 1000
Carácter Térmico		Nival			
		Altitud (msnm)	>4700		
		Temperatura (°C)	<1,5 °C		

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-IGAC (2009).

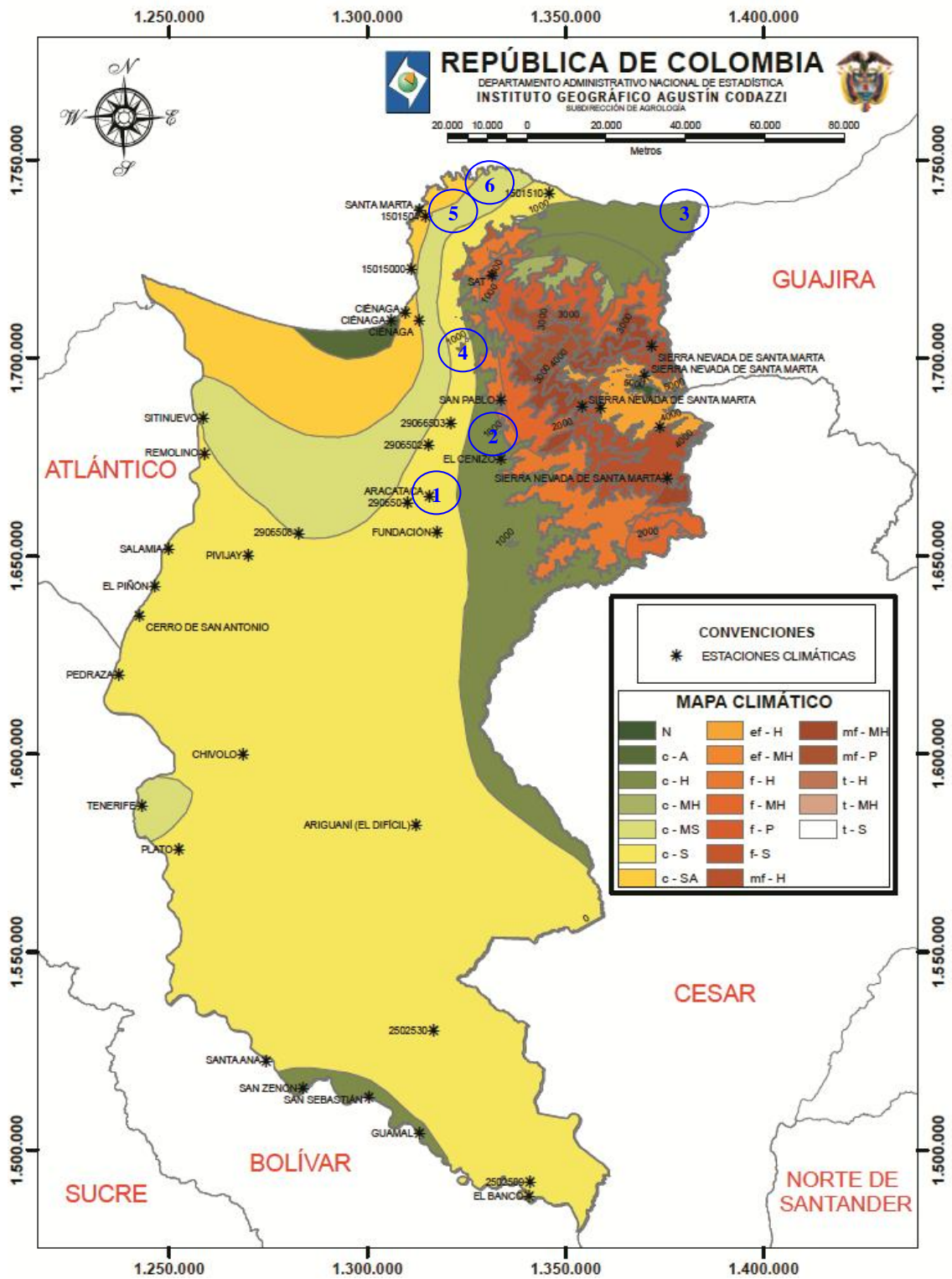
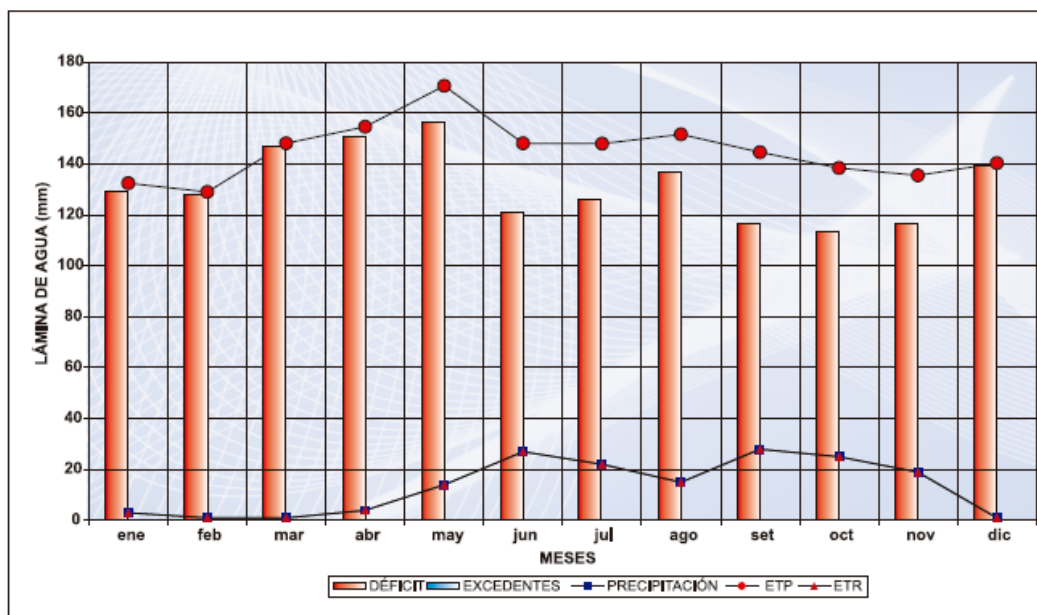


Figura 10. Zonificación Climática del departamento del Magdalena. Fuente: IGAC (2009).
 Modificado por el autor: (1) zona 1, (2) zona 2, (3) zona 3, (4) zona 4, (5) zona 5 y (6) zona 6.



1. El área entre líneas de ETP y ETR, corresponde al déficit
2. Donde P está por encima de ETR, corresponde al Almacenamiento en Reserva + Excedentes
3. Donde ETR está por encima de P corresponde a la utilización de la reserva del suelo (almacenamiento)

Figura 11. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Arido.

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-(IGAC, 2009).

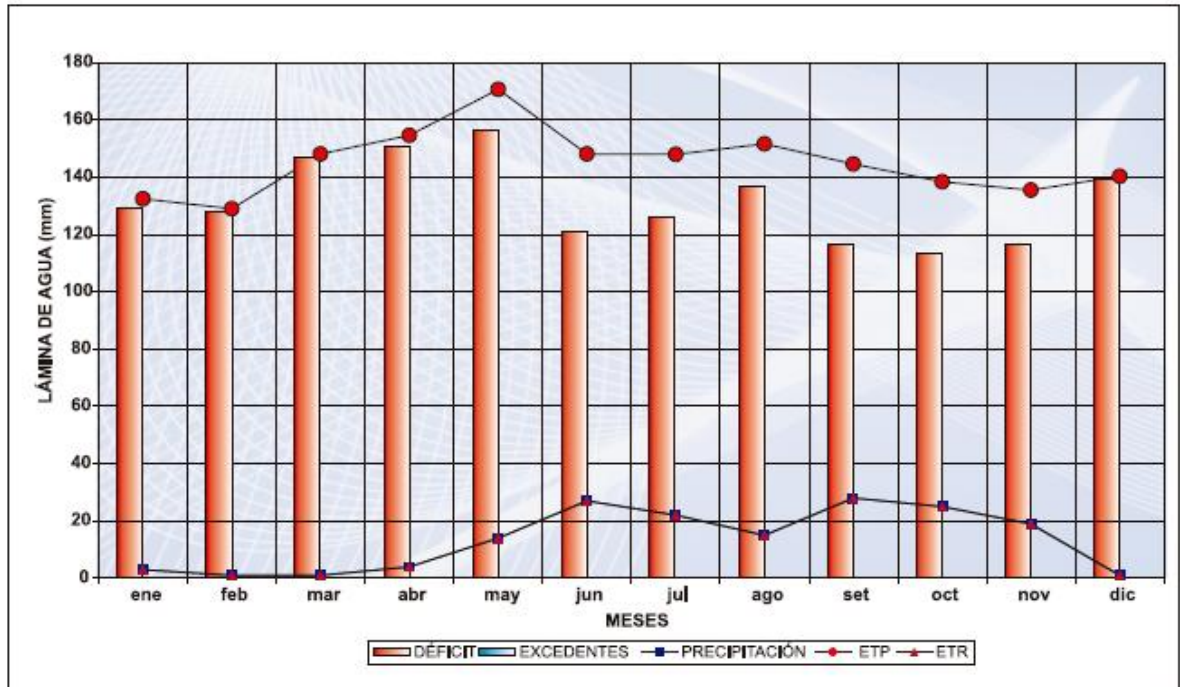
Tabla 8. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Semi árido.

DEPARTAMENTO		MAGDALENA											
ESTACIÓN		Ciénaga											
COORDENADAS PLANAS		ALTITUD											
NORTE 1709776	ESTE	981522									3		
CLIMA	Cálido,Semi Árido	SÍMBOLO	c - SA										
Reserva Máxima 100													
Balanceo Hídrico del Suelo	Primer trimestre			Segundo trimestre			Tercer trimestre			Cuarto trimestre			TOTAL
	Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	
Temperatura (C°)	26,6	27,0	27,1	27,4	27,7	26,9	26,7	27,0	27,0	26,7	26,9	27,0	27,0
ETP (mm)	132,4	129,0	148,1	154,6	170,7	148,1	147,9	151,7	144,6	138,4	135,5	140,3	1741,4
Precipitación (mm)	3,0	1,0	1,0	4,0	14,0	27,0	22,0	15,0	28,0	25,0	19,0	1,0	160,0
ETR	3,0	1,0	1,0	4,0	14,0	27,0	22,0	15,0	28,0	25,0	19,0	1,0	160,0
Déficit (mm)	129,4	128,0	147,1	150,6	156,7	121,1	125,9	136,7	116,6	113,4	116,5	139,3	1581,4
Reserva (mm)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Excedentes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

$$\Sigma \text{Precipitaciones} = \Sigma \text{ETR} + \Sigma \text{excedentes} \quad 300,0$$

$$\Sigma \text{ETP} - \Sigma \text{ETR} = \Sigma \text{déficit} \quad 1441,4$$

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-(IGAC, 2009, Pág. 108).



1. El área entre líneas de **ETP** y **ETR**, corresponde al déficit
2. Donde **P** está por encima de **ETR**, corresponde al **Almacenamiento en Reserva + Excedentes**
3. Donde **ETR** está por encima de **P** corresponde a la **utilización de la reserva del suelo (almacenamiento)**

Figura 12. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Semi árido.(IGAC, 2009).

• **Cálido Muy Seco (c - MS)**, unidad climática localizada al norte del departamento, a continuación de la unidad (c – SA), donde está ubicada la cabecera municipal de Tenerife y las estaciones No. 1501502, 1501504 y 2906508 del IDEAM; cubre un área aproximada de 1951,47 km², correspondiente al 8,42% del área departamental. Presenta las siguientes características (Tabla 9 y Figura 13):

- Altitud inferior a 500 msnm.
- Temperatura media anual (T) entre los 24,8 °C – 27,1 °C.
- Evapotranspiración potencial anual (ETP) que fluctúa entre 1348 - 1748 mm, siendo el mes de mayo en que registra los mayores valores.
- Precipitación promedio multianual (P), con valores que fluctúan entre 1680 a 2120 mm. Se presentan dos períodos de lluvias, el primero entre los meses de mayo a julio y el segundo entre los meses de septiembre a octubre.
- El déficit hídrico anual varía entre 188 a 366 mm, presentándose los mayores valores en el primer trimestre del año.

Capítulo 1. Suelos de Colombia

- El exceso hídrico anual presenta valores comprendidos entre los 307 a 959 mm anuales, siendo el mes de octubre el que presenta los mayores aportes.

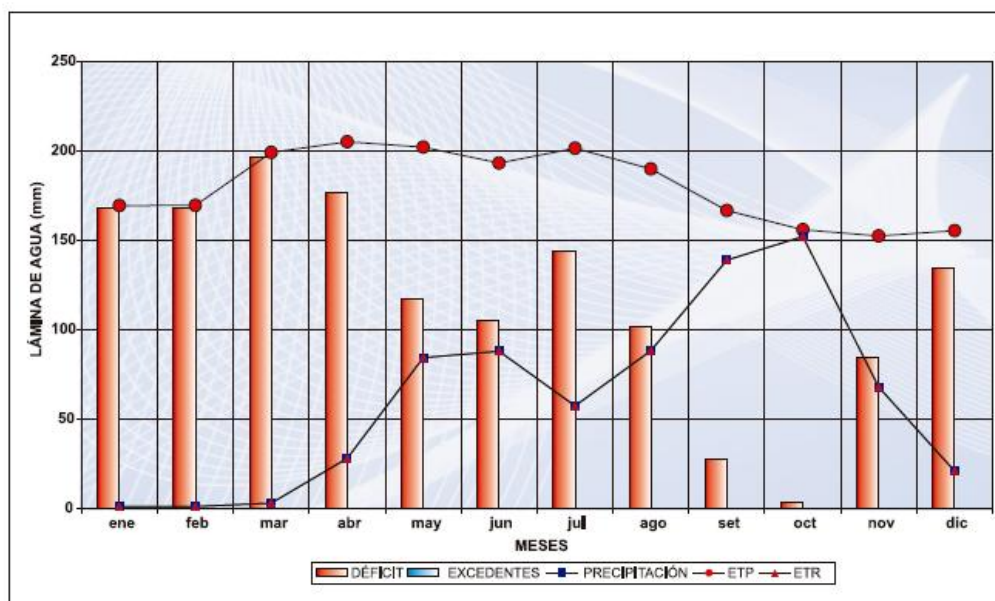
Tabla 9. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática Cálido Muy Seco.

DEPARTAMENTO		MAGDALENA												
ESTACIÓN		1501502												
COORDENADAS PLANAS		ALTITUD												
NORTE 1707930		ESTE		985164						20				
CLIMA		Cálido Muy Seco						SÍMBOLO		c -MS				
													Reserva Máxima	100
Balanceo Hídrico del Suelo		Primer trimestre			Segundo trimestre			Tercer trimestre			Cuarto trimestre			TOTAL
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	Ago	set	oct	nov	dic	
Temperatura (C°)		28,4	28,9	29,2	29,3	28,9	28,8	28,9	28,6	28,1	27,7	27,8	27,8	28,5
ETP (mm)		169,6	169,7	199,4	205,3	202,3	193,4	201,7	190,1	166,8	156,1	152,6	155,5	2162,7
Precipitación (mm)		1,2	1,2	3,1	28,3	84,6	88,1	57,5	88,4	139,1	152,3	68,1	21,0	733,1
ETR		1,2	1,2	3,1	28,3	84,6	88,1	57,5	88,4	139,1	152,3	68,1	21,0	733,1
Déficit (mm)		168,4	168,5	196,2	177,0	117,8	105,3	144,2	101,7	27,7	3,8	84,5	134,5	1429,6
Reserva (mm)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedentes		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

$$\sum \text{Precipitaciones} = \sum \text{ETR} + \sum \text{excedentes} \quad 733,1$$

$$\sum \text{ETP} - \sum \text{ETR} = \sum \text{déficit} \quad 1429,6$$

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-(IGAC, 2009, Pág. 108).



1. El área entre líneas de ETP y ETR, corresponde al déficit
2. Donde P está por encima de ETR, corresponde al Almacenamiento en Reserva + Excedentes
3. Donde ETR está por encima de P corresponde a la utilización de la reserva del suelo (almacenamiento)

Figura 13. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido Muy Seco

Fuente: IGAC(2009)

• **Cálido Húmedo (c - H)**, unidad climática localizada principalmente en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, donde está ubicada el sitio San Pablo, cubre un área aproximada de 138,65 km², la cual representa el 0,59% del área del departamento. Presenta las siguientes características ver (Tabla 10) y (Figura 11):

- Altitud inferior a 1000 msnm.
- Temperatura media anual (T) de 22 °C a 24 °C.
- Evapotranspiración potencial anual (ETP que varía entre 1000 - 1100 mm.
- Precipitación promedio multianual (P) entre 2200 a 2400 mm. Se presentan dos períodos de lluvias, el primero entre los meses de mayo a julio y el segundo entre los meses de septiembre a octubre.
- El déficit de humedad anual presenta valores inferiores a los 162 mm, en el primer trimestre del año.
- El exceso hídrico anual, alcanza valores de 1190 mm, y se presenta entre los meses mayo a noviembre.

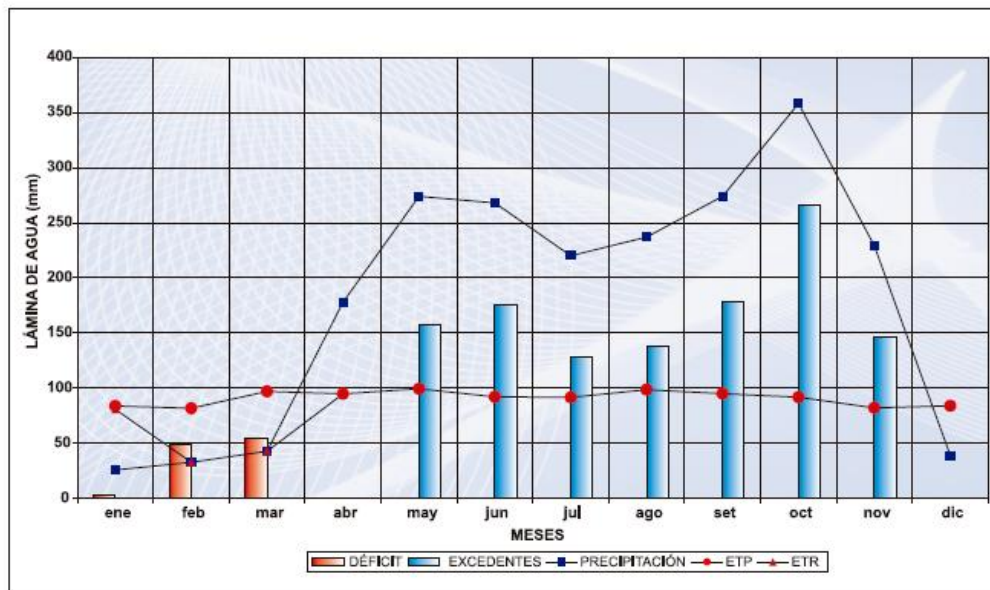
Tabla 10. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática Cálido Muy húmedo.

DEPARTAMENTO				MAGDALENA											
ESTACIÓN				San Pablo											
COORDENADAS PLANAS				ALTITUD											
NORTE 1687648		ESTE		1005204					800						
CLIMA				Cálido Muy Humedo					SÍMBOLO					c -H	
													Reserva Máxima		100
Balanceo Hídrico del Suelo		Primer trimestre			Segundo trimestre			Tercer trimestre			Cuarto trimestre			TOTAL	
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic		
Temperatura (C°)		22,1	22,7	23,1	22,9	22,9	22,4	22,2	22,9	23,0	22,7	22,1	22,2	22,6	
ETP (mm)		83,9	82,0	97,2	95,0	99,6	92,2	91,8	98,6	95,1	91,9	82,3	84,1	1093,6	
Precipitación (mm)		26,0	33,0	43,0	178,0	274,0	268,0	220,0	237,0	274,0	358,0	229,0	39,0	2179,0	
ETR		33,9	33,0	43,0	95,0	99,6	92,2	91,8	98,6	95,1	95,9	82,3	84,1	987,4	
Déficit (mm)		3,0	49,0	54,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	106,2	
Reserva (mm)		0	0,0	0,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	54,9		
Excedentes		0,0	0,0	0,0	0,0	157,5	175,8	128,2	138,4	178,9	266,1	146,7	0,0	1191,6	

$$\sum \text{Precipitaciones} = \sum \text{ETR} + \sum \text{excedentes} \quad 2119,0$$

$$\sum \text{ETP} - \sum \text{ETR} = \sum \text{déficit} \quad 188,2$$

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-(IGAC, 2009, Pág. 116).



1. El área entre líneas de **ETP** y **ETR**, corresponde al déficit
2. Donde **P** está por encima de **ETR**, corresponde al **Almacenamiento en Reserva + Excedentes**
3. Donde **ETR** está por encima de **P** corresponde a la **utilización de la reserva del suelo (almacenamiento)**

Figura 14. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido muy húmedo. Fuente: IGAC (2009)

• **Cálido Seco (c - S)**, unidad climática localizada en los sectores central noroccidental y sur del departamento; donde están ubicadas las cabeceras municipales de Sitionuevo, Chivolo, Plato, Remolino, El Piñón, Salamina, Cerro de San Antonio, Pedraza, Fundación, El Banco, Aracataca, Pivijay y Ariguaní y las estaciones No. 2502530, 2906501, 2906502, 2906503, 1501510 y 2502509 del IDEAM; cubre un área aproximada de 13865,20 km², correspondiente el 59,8% del área del departamento. Presenta las siguientes características (Tabla 12 y Figura 15).

- Altitud inferior a 500 msnm.
- Temperatura media anual (T) entre los 26,2 °C – 28,9 °C.
- Evapotranspiración potencial anual (ETP) que oscila entre los 1570 - 2290 mm, siendo el mes de mayo, el que registra un mayor valor.
- Precipitación promedia multianual (P) entre 808 a 2005 mm, presentándose dos períodos de lluvia, el primero entre los meses de mayo a junio; y el segundo entre los meses de septiembre a octubre.
- El déficit hídrico anual presenta valores que van de 230 mm a 1068 mm anuales, siendo el primer trimestre del año el que registra los mayores valores.
- El exceso hídrico anual registra valores inferiores a los 300 mm, siendo el mes de octubre el que presenta los mayores aportes.

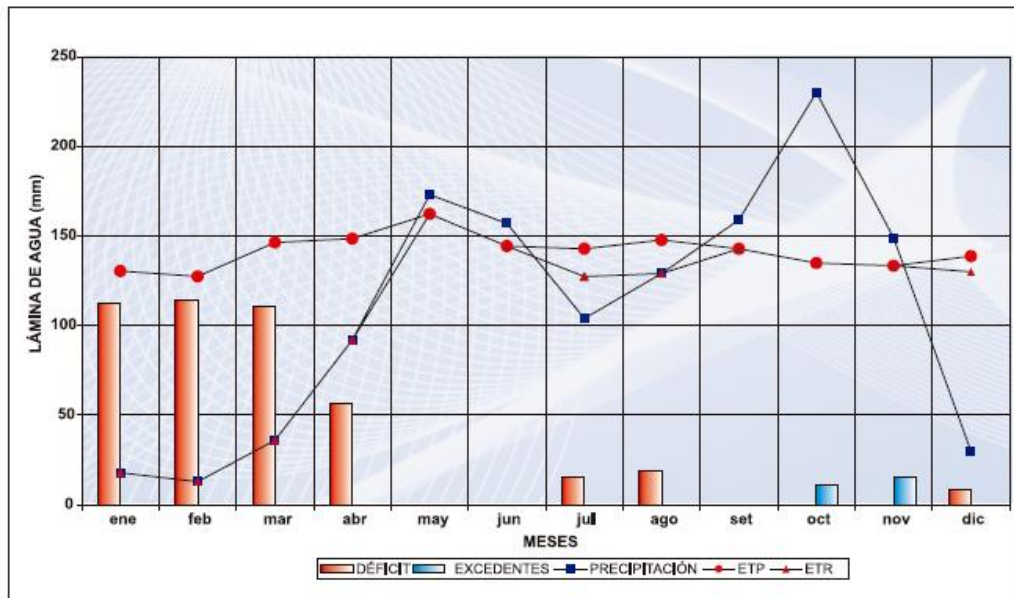
Tabla 11. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido seco.

DEPARTAMENTO		MAGDALENA													
ESTACIÓN		Fundación													
COORDENADAS PLANAS		ALTITUD													
NORTE 1654465		ESTE		988789						45					
CLIMA		Cálido seco		SÍMBOLO		c -S									
													Reserva Máxima	100	
Balanceo Hídrico del Suelo	Primer trimestre			Segundo trimestre			Tercer trimestre			Cuarto trimestre			TOTAL		
	Ene	feb	mar	abr	May	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic			
Temperatura (C°)	26,4	26,9	27,0	27,1	27,4	26,7	26,5	26,8	26,9	26,5	26,7	26,9	26,8		
ETP (mm)	130,4	127,5	148,4	154,6	162,3	144,3	142,9	147,8	142,9	134,9	133,4	138,7	1699,7		
Precipitación (mm)	18,0	13,0	92,0	8,0	173,0	157,0	104,0	129,0	159,0	230,0	149,0	30,0	1290,0		
ETR	18,0	13,0	92,0	8,0	162,3	144,3	127,4	129,0	142,9	134,9	133,4	130,0	1290,0		
Déficit (mm)	112,4	114,5	56,4	146,6	0,0	0,0	15,5	18,8	0,0	0,0	0,0	8,7	436,5		
Reserva (mm)	0	0,0	0,0	0,0	10,7	23,4	0,0	0,0	16,1	100,0	100,0	0,0			
Excedentes		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,8		

\sum Precipitaciones = \sum ETR + \sum excedentes 1290,0

\sum ETP - \sum ETR = \sum déficit 436,5

Fuente: Estudios General de suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Magdalena-IGAC (2009)



1. El área entre líneas de ETP y ETR, corresponde al déficit
2. Donde P está por encima de ETR, corresponde al Almacenamiento en Reserva + Excedentes
3. Donde ETR está por encima de P corresponde a la utilización de la reserva del suelo (almacenamiento)

Figura 15. Balance hídrico climático representativo de la unidad climática cálido seco. Fuente: (IGAC, 2009).

4.5. Vegetación

La distribución de la vegetación en una zona depende de la interrelación de factores tales como el clima, el relieve, el suelo, los animales y el hombre; estos factores se encargan de reflejar e identificar el tipo de vegetación que se presenta en un área determinada.

El clima es el factor más importante de la distribución de la vegetación y su influencia se manifiesta por medio de la acción de diferentes elementos tales como el agua, la luz y los vientos. El agua es imprescindible para la vida de las plantas ya que a través de ella obtienen su alimento.

La luz es útil para el crecimiento de las plantas; según sea la cantidad de luz recibida durante el día, la velocidad de crecimiento de las plantas será mayor o menor. En una comunidad vegetal determinada, la cantidad útil de luz determina el crecimiento y por ello depende en gran parte la posición de las plantas, las copas de los árboles del estrato superior reciben el máximo de luz y reducen así mismo la cantidad de luz que llega a los estratos inferiores. En algunos casos se observa que árboles de gran tamaño y follaje cortan el paso de la luz con tanta eficiencia que el suelo del bosque se encuentra casi libre de arbustos y plantas herbáceas.

El viento contribuye a la dispersión de las plantas, transportando de un lugar a otro, esporas y semillas que dan lugar posteriormente a nueva vegetación. El relieve es un factor que modifica el clima, es por ello que la vegetación cambia de acuerdo con la altitud y en consecuencia existe una gran variedad de especies. El suelo sirve de sostén y sustento a las plantas; también es determinante del tipo de vegetación en un área específica, en el sentido que según sea la clase de suelos así será la vegetación que se desarrolla allí.

4.5.1. Vegetación natural

Los tipos de vegetación natural predominante de acuerdo con los diferentes sectores que conforman la división político-administrativa del departamento se puede clasificar en:

- **Sabanas:** Son abundantes dentro del territorio del Magdalena; se caracterizan unas por la presencia de chaparrales de 4 a 8 m de altura, rara vez más altos y otros por la existencia de termitas o sea pequeños montículos construidos por las hormigas y localizados en las zonas más secas. Además, cabe mencionar dentro de estas estepas de gramíneas, especialmente en una faja que se extiende entre Pivijay y Salamina.

- **Bosque seco:** Es característico de las áreas más secas (Figura 16). Cubre las llanuras del río Magdalena inferior rodeando además la Sierra Nevada de Santa Marta al norte y al sur, y determina de una manera decisiva el aspecto del paisaje. La sequía en estas zonas es debida a la acción de los vientos alisios de este-noreste (que soplan durante los meses de diciembre hasta junio). Pueden clasificarse en dos formaciones:

Espinares de arbustos espinosos

Cardonales de cactáceas arboriformes. Su origen y aspecto probablemente han sido determinados en su comienzo únicamente por la falta de agua. En los dos últimos siglos se agregaron al pastoreo y otras influencias humanas. En los alrededores de Santa Marta y en la zona de Bahía Concha predominan los cardonales; como tipo de vegetación adaptado a un tipo de sequía mayor que el de los espinares, con suelos fuertemente lateríticos. Entre las especies más predominantes se pueden citar: cactáceas columniformes y cactáceas bajas, entre otras. Actualmente, estos bosques se hallan muy degradados y devastados.



Figura 16. Vegetación natural, típica de las áreas secas.

- **Bosque higrófilo:** Se presenta este tipo de vegetación caracterizada por la presencia de árboles de 30 a 40 metros de altura, ricos en lianas y epífitas, especialmente, en la parte media de la Sierra Nevada de Santa Marta, cubriendo gran parte de la tierra templada. Se extienden parcialmente hasta los bosques de *Polyepis sericea* (coloradito).

- **Manglares:** Es una formación característica en las costas tropicales y subtropicales, desarrollándose en suelos salados, arcillosos, rara vez arenosos. En el Magdalena se localizan en la parte inferior de la Ciénaga Grande de Santa Marta y la Isla de Salamanca. Producen leña y taninos.

- **Vegetación de pantanos:** Está caracterizada por la presencia de la denominada Eíchornia, conocida más comúnmente en la región como taruya, o buchón muy propagada en las zonas anegadas, obstaculizando el transporte por embarcaciones, especialmente las que usan motor fuera de borda. La taruya es responsable de muchos cambios en el cauce navegable de nuestros ríos, pues en la época seca se arraigan al suelo, produciendo sedimentaciones en las aguas más crecidas, cerrando los canales definitivamente (Figura 17).



Figura 17. Vegetación de pantanos en el departamento del Magdalena.

4.5.2. Formaciones vegetales

La acción del hombre sobre la vegetación es igualmente importante ya que es uno de los factores que la pueden cambiar substancialmente hasta llegar a desaparecerla casi totalmente: esto es lo que ocurre en el Magdalena, la acción antrópica ha sido tan devastadora que actualmente la vegetación natural ha desaparecido y únicamente se encuentran algunos relictos. Es así, como en el departamento y en la Sierra Nevada de Santa Marta se presentan una gran variedad de especies destacándose las siguientes formaciones vegetales, según la clasificación de Holdridge.

4.5.2.1. *Monte espinoso tropical (me-T):*

Se localiza en una estrecha faja que bordea la costa Caribe desde Punta Brava, al sur de Santa Marta, hasta punta Quitasombrero en la ensenada de Neguange, en una anchura aproximada de cinco km y una longitud de 28 km (Figura 18). Tiene como valores climáticos una temperatura media por encima de los 24 °C y un promedio de lluvia anual entre 250 y 500 mm, con dos épocas marcadamente diferentes: la una en los meses de diciembre, febrero, marzo y abril, completamente seca debido primordialmente a los vientos que vienen del mar y que le dan al ambiente un sabor ligeramente salino y la otra que comprende los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre octubre y noviembre, con marcada lluviosidad en octubre debido a que los vientos alisios al encontrar en su “recorrido masas montañosas provocan enfriamientos en la masa de aire, por lo que la precipitación se hace notoriamente mayor”.



Figura 18. Vegetación de la formación monte espinoso tropical al norte de Santa Marta.

El paisaje vegetal está dominado primordialmente por cactus columnares y arbustos espinosos de hojas pequeñas y caedizas, pudiéndose determinar un predominio de árboles y arbustos como el guamacho, piñuela, tuna, indio desnudo, trupillo y otros de esta formación, cuya lista se haría interminable. Algunas especies indicadoras de esta formación vegetal se mencionan en la (Tabla 12).

Tabla 12. Especies indicadoras del Monte espinoso tropical (me - T)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Guamacho	<i>Pereskia guamacho</i>	CACTACEAE
Espinito	<i>Pitheccellobium sp.</i>	MIMOSACEAE
Cardón	<i>Lemaircocercus griceus</i>	CACTACEAE
Tuna	<i>Opuntia sp.</i>	CACTACEAE
Trupillo	<i>Prosopis juliflora</i>	MIMOSACEAE
Pelá	<i>Acacia farnesiana</i>	MIMOSACEAE

4.5.2.2. Bosque seco tropical (bs-T)

Presenta como características climáticas y orográficas alturas que oscilan de 0 a 1100 msnm aproximadamente; precipitación promedio anual entre 1000 y 2100 mm y una temperatura superior a 24 °C; se pueden definir muy claramente tres épocas de lluviosidad, así:

- Una completa sequía correspondiente a los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y aun abril.
- Una de mediana pluviosidad correspondiente a los meses de junio, julio y agosto.
- Un período de gran pluviosidad correspondiente a los meses de mayo, septiembre, octubre y noviembre; si se analiza la disponibilidad de agua para la vegetación, tenemos preferencialmente a la época de septiembre, octubre, noviembre y mayo, dedicándole atención especial a la época grande de sequía a que se ha hecho alusión. Esta formación vegetal, abarca una de las zonas agrícolas y ganaderas más importantes de Colombia, con variedades de pastos como la guinea, pará, yaraguá, uribe y gramíneas naturales en todas las sabanas. En la Tabla 15 y Figura 19 se listan y muestran las especies indicadoras del bosque seco tropical.

Tabla 13. Especies indicadoras del Bosque seco tropical (bs - T)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Dinde	<i>Maclura tinctoria</i>	MORACEAE
Kumulá o carrito	<i>Aspidosperma polyneuron</i>	APOCYNACEAE
Samán o campano	<i>Pitheccellobium sainan</i>	MIMOSACEAE
Capote	<i>Machaerium capote</i>	FABACEAE
Balso	<i>Ochroma pyramidale</i>	BOMBACACEAE
Caracolí	<i>Anacardium excelsum</i>	ANACARDIACEAE



Figura 19. Vegetación de la formación bosque seco tropical.

4.5.2.3. *Bosque muy seco tropical (bms-T)*

Como límites climáticos presenta una temperatura superior a 24 °C y promedios de lluvia que oscilan entre 500 a 1000 mm anuales. Se presentan dos épocas definidas: un período seco que se inicia en diciembre y termina en abril y otro período lluvioso que va de mayo a noviembre con un pequeño veranillo en el mes de julio. Durante el período de sequía en la costa Caribe, los árboles y arbustos de esta formación pierden el follaje y solamente algunas especies conservan sus hojas como el *Capparis adoratissima* (Naranjuelo). En esta formación cabe mencionar la presencia de los manglares, vegetación adaptada a vivir en suelos regularmente inundados y salobres; se localizan en zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos y caños de agua dulce. Para su funcionamiento necesita de factores externos tales como flujo de la marea, salinidad del suelo, disponibilidad de aguas dulces y nutrientes.

La importancia del manglar radica en que es uno de los principales elementos de la cadena trófica ya que aporta materia orgánica en forma de hojas, flores y frutos que al caer al agua sirven de alimento a algunas especies de peces y organismos acuáticos, estos a su vez sirven de alimento a las aves que anidan en su follaje o se albergan allí durante alguna época del año cuando pasan en su recorrido migratorio. En el Magdalena existen tres clases de mangle: el Rojo, el Salado y el Negro; estos se encuentran principalmente bordeando la

planicie fluvio-marina de la Ciénaga Grande de Santa Marta y la planicie aluvial al pie de la Sierra Nevada. Como se mencionó anteriormente en los últimos años el manglar ha sufrido un proceso de degradación y en la actualidad la muerte del manglar se ha extendido a grandes áreas sobre todo a la Isla de Salamanca. La Tabla 16 muestra algunas de las especies indicadoras del bosque muy seco tropical.

Tabla 14. Especies indicadoras del Bosque muy seco tropical (bms - T)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Olivo	<i>Capparis odoratisima</i>	CAPPARIDACEAE
Guayacán carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i>	ZYGOPHYLLACEAE
Diomate o gusanero	<i>Astronium graveolens</i>	ANACARDIACEAE
Trébol	<i>Platymiscium pinnatum</i>	FABACEAE
Cruceto	<i>Randia armata</i>	RUBIACEAE
Dividivi	<i>Caesalpinia coriaria</i>	CAESALPINACEAE
Olivo	<i>Capparis odoratisima</i>	CAPPARIDACEAE

4.5.2.4. Bosque muy húmedo subtropical (bmh-ST)

Se desarrolla en la Sierra Nevada de Santa Marta entre 1500 y 2500 metros de altura sobre el nivel del mar y corresponde en Colombia al llamado “Cinturón Cafetero”, con límites climáticos que varían entre 17 a 24 °C, de temperatura y 2000 a 4000 mm de precipitación promedio anual (Figura 20). El exceso de lluvias y la pendiente del terreno son los factores que afectan la agricultura en esta formación. Cuando se establecen cultivos limpios, los suelos se ven expuestos a ser lavados y los terrenos se esterilizan rápidamente. En su estado original, el bosque muy húmedo subtropical es un bosque alto, siempre verde, con algunas epifitas y quiches sobre las ramas. La falta de vías de penetración ha servido para proteger ciertas áreas, pero en la actualidad se verifica una gran presión humana sobre esas apartadas regiones. Algunas de las especies indicadoras de esta formación se listan en la (Tabla 15).

Tabla 15. Especies indicadoras del Bosque muy húmedo sub-tropical (bmh - ST)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Zurrumbo o barranquillo	<i>Trenia micrantha</i>	ULMACEAE
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	MELIACEAE
Gualanday	<i>Jacaranda caucana</i>	BIGNONIACEAE
Carbonero	<i>Albizia carbonaria</i>	MIMOSACEAE
Cámbulo	<i>Erythrina fusca</i>	FABACEAE

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Aguacatillo	<i>Persea coerulea</i>	LAURACEAE
Guásimo colorado	<i>Luehea secmanni</i>	TILIACEAE



Figura 20. Vegetación de la formación bosque muy húmedo.

4.5.2.5. *Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB)*

Se localiza en la Sierra Nevada de Santa Marta entre los 2500 a 3200 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente, y con valores climáticos que oscilan entre 12 a 18 °C con una precipitación media anual de 2000 a 4000 mm. El relieve es muy pronunciado y desigual con quebradas y ríos que corren por cañones escarpados y profundos sin formar valles aluviales, ríos estos que en épocas de lluvias dan margen a violentas inundaciones y deslizamientos de terrenos, fenómeno mucho más agudo cuando las zonas están desprovistas de cobertura vegetal. La Tabla 18 muestra las especies indicadoras de esta formación vegetal.

Tabla 16. Especies indicadoras del Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Carate	<i>Visinia guianensis</i>	CLUSIACEAE
Arboloco	<i>Montanoa quadrangularis</i>	ASTERACEAE
Roble	<i>Quercus humboldtii</i>	FAGACEAE
Cucubo	<i>Solanum inopinum</i>	SOLANACEAE
Yarumo	<i>Cecropia teleincana</i>	CECROPIACEAE

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Gaque	<i>Clusia multiflora</i>	CLUSIACEAE
Cedrillo	<i>Brunellia comocladifolia</i>	BRUNELLIACEAE

4.5.2.6. Bosque muy húmedo montano (bmh-M)

Se desarrolla en las partes altas que permanecen expuestas a los vientos húmedos y que corresponden a las denominaciones de “Páramo y Subpáramo” según Cuatrecasas. Su formación se inicia en lugares que tienen altura alrededor de los 3500 m sobre el nivel del mar, una temperatura de 6 a 12 °C y un promedio de lluvias anual que varía entre 1000 y 2000 mm; dada la cantidad de niebla que soporta se le llama “bosque nublado”. Las plantas a estas alturas tienen una estructura típica que les permite acomodarse a las especiales condiciones ecológicas que soportan. Dominan el paisaje el frailejón, de bellas inflorescencias amarillas y con un conjunto de hojas arrosetadas, forma típica del páramo que Cuatrecasas denomina el tipo biológico de Caulirrósula. En la Tabla 17 se relacionan algunas de las especies de esta formación vegetal.

Tabla 17. Especies indicadoras del bosque muy húmedo montano (bmh-M)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Encenillo	<i>Weinmannia tomentosa</i>	CUNONNIACEAE
Mano de oso	<i>Orcopanax discolor</i>	ARALIACEAE
Pegamosco	<i>Befaria resinosa</i>	ERICACEAE
Chilco colorado	<i>Escallonia floribunda</i>	GROSSULARIACEAE
Canelo de páramo	<i>Drymisgranadensis</i>	WINTHERACEAE
Helecho	<i>Jamesonia bogotensis</i>	POLYPODIACEAE
Frailejón	<i>Espeletia hartwegiana</i>	ASTERACEAE
Paja	<i>Calamagrostis efussa</i>	POACEAE

4.5.2.7. Bosque pluvial montano (bp-m)

Se localiza en alturas que fluctúan entre 4000 y 4500 metros sobre el nivel del mar, temperaturas que van de 6 a 12 °C y un promedio anual de precipitación superior a 2000 mm. Está constituido por arbustos y árboles de tamaño reducido, con tramos cubiertos de musgos y líquenes en tal abundancia que no permite ver la corteza, pues las ramas están pobladas de quiches y epifitas. Dada la frecuencia con que se suceden las lluvias y lloviznas, el ambiente de esta formación es supremamente húmedo, permanece cubierta la región de nubes buena

parte del año. En la Tabla 18 se mencionan las especies indicadoras del bosque pluvial montano.

Tabla 18. Especies indicadoras del bosque pluvial montano (bp-M)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Esterilla	<i>Orthozanthus chimbarascensis</i>	IRIDACEAE
Pagoda, tiban	<i>Escallonia myrtilloides</i>	GROSSULARIACEAE
Genciana	<i>Gentiana corymbosa</i>	GENTIANACEAE
Cachitos	<i>Halcnia asclepiadae</i>	GENTIANACEAE
Cortadera	<i>Carex pichichensis</i>	CYPERACEAE
Tagua	<i>Gaiadendron punetatum</i>	LORANTHACEAE

4.5.2.8. Las formaciones de páramo pluvial subalpino, tundra pluvial alpina y la nival

Son aquellas que aparecen en los niveles más altos, en los cuales existen formaciones de nieves y cuya vegetación está dominada por un pajonal formado por gramíneas, especialmente de los géneros festuca y calamagrotis, romero, colorado, chitos y frailejones. Sus límites climáticos están entre 6 y 10 °C, con variaciones de pluviosidad entre 500 y 2000 mm de promedio anual. Estas formaciones han sido estudiadas por Cuatrecasas y las denomina páramo propiamente dicho y superpáramo. En las Tablas 21 y 22 se señalan algunas de las especies indicadoras de estas formaciones vegetales.

Tabla 19. Especies indicadoras del Páramo pluvial subalpino (pp-SA).

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Genciana	<i>Gentiana corymbosa</i>	GENTIANACEAE
Fraylejón	<i>Espeletia sp.</i>	ASRERACEAE
Chile o guardarrocío	<i>Hypericum larixifolium</i>	CLUSIACEAE
Helecho	<i>Lycopodium sp.</i>	LYCOPODIACEAE
Romasa sangreloro	<i>Rumex acetossella</i>	POLYGONACEAE
Chicoria	<i>Hypochoeris sesciliflora</i>	ASTERACEAE

Tabla 20. Especies indicadoras de la Tundra pluvial alpina (tp-A).

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Senecio	<i>Senecio canescens</i>	ASTERACEAE
Junco	<i>Luzula racemosa</i>	JUNCACEAE
Paja	<i>Agrostis nigritella</i>	OACEAE

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Nn	<i>Cerastium caespitosum</i>	CARIOPHYLLACEAE
Nn	<i>Draba pachythyrsa</i>	
Senecio	<i>Senecio gelidus</i>	ASTERACEAE



5. Bibliografía

- Bendeck, (1993). Naturaleza y composición del humus. En Aspectos Ambientales para el Ordenamiento Territorial del Occidente del Departamento de Caquetá. Inst. Geogr. Agustin Codazzi. p. 565-630.
- Besoain, E. (1984). Mineralogía de arcillas se suelos. Instituto interamericano para la agricultura. San José. Costa Rica.
- Blokhuys, W. A. (1989). Management of Vertisols for improved agricultural production. In proceedings IBSRAM Workshop, 1985. India, Patancheru Intern. Crop Research Inst. for the Semiarid Tropics (ICRISAT). p. 37-44.
- Borggaard, O. K. (1985). Organic matter and silicon in relation to the crystallinity of soil iron oxides. . p. 398-406. ActaAgricultural Scandinavica, 35.
- Buol, S. (1981) Génesis y clasificación de los suelos. México:343 p.
- Bourman, P. Zech.W.(1994). organic matter in podzoi-Bhorizons-changes with profiles development. In volume 6b: Comission V: osterSessions. Tranactions. 15° Congreso mundial de la ciencia del suelo. Acapulco, México. p. 137-138.
- Brindley, G. (1980). Quantitative x-ray mineral analysis of clays in crystal structures of clay minerals in their x-ray identification Brindley G.W. Brown , G. edit. Min. Soc. Monogr, 5. Min Soc. London. p. 411-438.
- Burbano O. H. (1989). El suelo. Una visión sobre sus componentes biorganicos. Univ. De Nariño. Serie investigaciones N°1. 447 p.
- Centro De Investigacion Y Educacion Popular (CINEP). (1998). Colombia país de regiones. [en línea] Tomo I, II, III, y IV. Cinep – Colciencias. Santa fé de Bogotá. Disponible en Internet: <<http://www.lablaa.org/blaavirtual/geografia/region3/indice.htm>>.
- Coleman, D., Oades, J., & Uheara, G. (1989). Introduction Soil Organic Matter: tropics - vs – temperate. In Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. Ed.: Coleman, Oades, Uheara. Univ. Hawaii press. Honolulu, Hawaii, p. 1-5.
- Colombia. Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, Reservas Forestales Protectoras Nacionales De Colombia – Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2005).Atlas básico. 2da Ed. Bogotá D.C: IGAC,. 127 p.
- Contraloría General De La Republica De Colombia.(2006). Estado de los recursos y del ambiente 2005-2006: licenciamiento ambiental y ocupación ilegal de bienes de uso público. Bogotá.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (CORPOICA). (2002). Aspectos a tener en cuenta para la reglamentación de la tasa del uso del agua. Tibaitatá – Bogotá.

- De Becerra, E. (1988). Material Orgánico en Suelos de Colombia en Suelos y Bosques de Colombia. Inst. Geogr. Agustín Codazzi. Subd. Agrol. Bogotá. p. 45-48.
- De Becerra. (1986). Comportamientos de la materia orgánica en suelos de la Orinoquia. Inst. Geogr. Agustín Codazzi. Subd. De Geografía. Proyecto de investigación en la Orinoquia. Programa segunda expedición botánica. Diagnostico Geográfico del Nororiente del Vichada. Volumen 5.2. Bogotá. p: 1-59.
- Del Valle, J. Moreno, F. Orrego S. (2003). Los bosques tropicales y su contribución a la mitigación del cambio climático. En: Medición de la Captura de Carbono en ecosistemas forestales de Colombia. ORREGO, et al (ed). Bogotá: Panamericana, Formas e Impresos, S. A. 2003. pp. 3-43.
- De Las Salas G. (1987). Suelos y Ecosistemas Forestales. Inst. Interam. de Coop. para la Agricultura. San José. Costa Rica. 447 p.
- Departamento Administrativo Nacional De Estadística, DANE. (2004). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Sistema de Información del sector Agropecuario (SISAC). Proyecto SISAC -DANE- Min. De Agricultura y Desarrollo Rural.
- Departamento De Agricultura De Los Estados Unidos. (2006). Keys to Soil Taxonomy. 10th Ed. Estados unidos: USDA, 332p.
- Duque, G. (1998) Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
- Earnest. C. (1984). Thermal Analysis Hectorite. Part I. Thermogravimetry in Thermal Analysis of Clays. Minerals and coal. Perkin Elmer Corporation. Norwalk, CT. USA. p. 19-32.
- Fassbender, W., Bornemisza, E. (1987). Química de Suelos, con énfasis en los suelos de América Latina. Inst. Interam. de Coop. para la agricultura. San José. Costa Rica. 420 p.
- Federación Internal. de Productores Agropecuarios. (2009). Cambio Climático en Colombia. Soluciones de los Agricultores. Paris.
- Federación Nacional De Cultivadores De Palma De Aceite. (2008.) Anuario estadístico. Bogotá, D.C: Fedepalma.
- Fernández, L. J. (1989). El análisis térmico diferencial y sus aplicaciones. Men. Sem. Técnicas y rutinas para la caracterización de las arcillas. ProgrCeram. Y Vitr. Cuaderno N° 1 Fac. Cien. U. Nal. Ingeominas. Ademinas, Medellin. p. 39-75.
- Fernández, L. (1992). Ensayos de calibración con el sistema analizador térmico de alta temperatura (Equipo DTA –Perkin Elmer) en algunos aspectos físicos, químicos, biológicos y mineralógicos. Investigaciones Vol. 4 N°1 inst. Geog. Ag. Codazzi. Subd. Agrol. Bogota. p. 145-165.

- Ferraro, J. (1982). The sadtler infrared spectra handbook of minerals and clays saddler, research lab. Philadelphia.
- Flórez, A. (2003) Colombia: Evolución de sus relieves y modelados. Univ. Nacional de Colombia. Bogotá: Unibiblos. 238 p.
- Florez, A. (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Bogotá: universidad Nacional de Colombia.
- Foncuberta, J. (1985). La espectroscopia Mossbauer. Principios y Aplicaciones. Rev. Col. De Química. Vol. 14 N°1-2. p. 99-116.
- Galvis, L. (2001). La topografía económica de Colombia. Banco de la República. Cartagena de Indias (Documentos de trabajo sobre economía regional. No. 22).
- Gobernacion del Magdalena. (2009). Plan de desarrollo 2008-2011. [web en línea]. <<http://www.gobmagdalena.gov.co>> [Consultada 21-05-2009].
- González, F. (1998). Inventario Preliminar de Gases de Efecto Invernadero. Fuentes y Sumideros: Colombia-1990. Acad. Col. de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Bogotá: Colección Jorge Álvarez Lleras. No. 11. de Guadalupe Ltda. 171 p.
- Guerra, G. E., & Wood, G. P. (s.f.). Uso de la Tierra en Colombia. p 1-45. Facultad Nacional de Agronomía, XIII(57).
- Herrera, M., Del Valle, K. & Orregos, S. (2003). Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques primarios intervenidos y secundarios. En Medición de la Captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia S. A. Bogotá. pp. 145-167.
- Holdridge, L. (1982). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José. Costa Rica. 216 p.
- IDEAM. (2006). Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero. 29p. Colombia.
- IDEAM. (2009). Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero. Colombia.
- IGAC. (1995). Estudio general de suelos de la zona quebrada de la sierra nevada de Santa Marta. 385p. Colombia.
- IGAC. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. p. 720-725.
- IGAC. (2009). Estudio General de suelos y Zonificación de Tierras. Departamento del Magdalena, escala 1:100000. 489p.
- Instituto Colombiano de Ecología y Minería (INGEOMINAS). (2001). Introducción a la Geología con ejemplos de Colombia. Bogotá.

Capítulo 1. Suelos de Colombia

- Instituto De Investigación E Información Geocientífica, Minero-Ambiental Y Nuclear. (1999). Geología del Departamento del Magdalena. Bogotá, D.C. Ingeominas.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1975). Mineralogía de los suelos en relación con génesis, fertilidad y clasificación de suelos. Bogotá D.C: IGAC. 828 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sub. Agrol. Bogotá D. E. p. 502.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1993) Características geográficas del Magdalena. Bogotá D. C: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1994). Memorias del Primer Taller sobre Cobertura Vegetal, Clasificación y Cartografía. Subd. de Geografía. Cervantes Impresores. Bogotá. 152 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC), Corporación Colombiana De Investigación Agropecuaria (CORPOICA). (2002) Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia. [CD-ROM]. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2002). Suelos del Andén Pacífico. Subd. De Agrología (en Sección 3. 479-527 p. prensa).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2003). Mapa de Suelos de Colombia (escala 1:500.000). Subd. de Agrología. 26 planchas y CD. Bogotá. (en prensa). Territorial del occidente del departamento de Caquetá. Cap. 3.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM. (2001) Colombia en el cambio global. En: El Medio Ambiente en Colombia. 2001. Capítulo. 2. pp. 14-34.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM. (2001) Emisiones al ambiente en Colombia. En: El Medio Ambiente en Colombia. 2001. Capítulo. 2. pp. 530-534.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM. (2002) Perfil del Estado. Recursos naturales y del Ambiente en Colombia En: Sistemas de información Ambiental de Colombia SIAC. Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM. Sinchi. Humboldt. INMAR. Embajada del Reino Unido de los Países Bajos. 2002. Tomo 3, 546 p.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales – IDEAM. (2000) Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de gases de efecto invernadero. 2000. 29 p.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM). (2004). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. [en línea]. Bogotá, Disponible en internet: <http://www.ideam.gov.co/infoanual/PDF-Seccionados/IformaaltacalidadCompleto.pdf>.

- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM). (2001). Incendios de la cobertura vegetal. Bogotá.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM). (?). Tierras afectadas por la desertificación en Colombia. [en línea] Disponible en Internet: <www.ideam.gov.co/indicadores/suelos3.htm>.
- IPCC. (2002.) Uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura. Resumen para responsables de políticas.
- IPCC. (2000) Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. WATSON, R.T. et al (Ed.) 2000. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pub/srlulucf-s.pdf>.
- IUSS, ISRIC, FAO.(2006). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Segunda edición. 117p
- Jaramillo, D. F., Parra L. N., Gonzalez, L. H. (1994). El recurso suelo en Colombia: Distribución y Evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. 613p. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Jenny, H. (1980). The Soil Resource. Origin and Behavior. Springer-Veriag. New York. Heidelberg Berlin. 377 p.
- Kalmanovitz, S. & López, E. (2006) La agricultura colombiana en el siglo XX. Bogotá: Fondo de Cultura Económica.
- Klinka, K., Green, R., Trowbrioge, R., Lowe. L. (1981). Taxonomic Classification of Humus Forms in Ecosystems of British Columbia. First Approximation. Ministry of Forests, Province of B. Columbia. Min Forest. Vancouver. Canadá. p. 54.
- Kononova, M. (1982). Materia Organica del Suelo. Su naturaleza, propiedades y métodos de investigación. Oikos-tan, S. A. Ed. España, Barcelona. 365 p.
- Kunze, G. W. & Dixon F. J. (1986). Pretreatment for mineralogical analysis in Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and mineralogical methods. Agron. Monograph N°9, 2nd. Ed, Am. Soc. of Agr-Soil. Sc. Soc. of Am. South Segoe Road. Madison Usa. p. 91-100.
- Leifeld, J., Bassin, S., & Fuhrer, J. (2005). Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics and altitude. Agriculture, Ecosystems and Environment. 105p, p. 255-266.
- León, S. T., Cock, A. V., Durán, N. D., Herreño, A. M., y Quiroga, C. P. (2001). Estado del recurso suelo en Colombia. En: Estado de los recursos naturales y del ambiente 2000 – 2001. Contraloría General de la República. Bogotá. 292 p.

Capítulo 1. Suelos de Colombia

- León, S.T. (2002). Fundamentos ambientales de la Agricultura Ecológica. Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Estudios Ambientales (IDEA). Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. 17p.
- León, S. T., Rodríguez, S. L. (2002). Ciencia, tecnología y ambiente en la agricultura colombiana. Cuadernos Tierra y Justicia No 4. Instituto Latinoamericano de Servicios Legales Alternativos. Bogotá. 44 p.
- León, S.T., Sánchez, A., Cruz, M., Poveda, A., Díaz, O., Rubio, R., Silva, A., Valenzuela, E. Y Velandia A. (2003). Incorporación de consideraciones de biodiversidad en la política sectorial agropecuaria de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”. Bogotá, 276p.
- León, S.T. (2003). Factores tecnológicos y ambientales en la competitividad de la agricultura colombiana. Consultoría elaborada para el Ministerio de Agricultura Desarrollo Rural, el Programa de Cooperación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Banco Mundial. Bogotá. 92 p.
- León, S.T. (2003). Transgénesis, agricultura y medio ambiente. Memorias VII Congreso Internacional de Integración Regional - Fronteras y Globalización en el Continente Americano. Bogotá. Octubre 27 al 31 de 2003. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias Económicas. En prensa.
- Llano, A., Suárez, R., Londoño, F. (2004). Diseño de un proyecto piloto para el acceso al uso de la tierra – Documento Final. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Unidad de Preparación del Programa de Transición de la Agricultura y el Medio Rural Colombianos. Bogotá. 95p.
- Malangón, D., (1995). Suelos de Colombia - Origen, evolución, clasificación y uso - Subd. de Agrología. Ed. Canal Ramírez Antares. Bogotá. 632 p.
- Malagón, D., Santana, L. (1997). Los suelos de la región del Caribe colombiano. Suelos Ecuatoriales 27:15-26.593.
- Malagón, D. (1998). El recurso suelo en Colombia - Inventario y problemática. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. XXII. No. 82. p. 13-52. Santafé de Bogotá.
- Malagón Castro, D. (2002). Los Suelos de Colombia. IGAC.
- Malagon Castro, D. (2003). Ensayo Sobre Tipología de Suelos Colombianos; Énfasis en Génesis y Aspectos Ambientales.
- Malagón, C. y Correa, A. (2004.) El Uso de la Tierra en Colombia y sus Relaciones Ambientales. Ponencia Magistral. XVI Congr. Latin. XII Congr. Nal. de la Ciencia del Suelo. Cartagena (en prensa).
- Mejia L. (1982). Mineralogía de los suelos de los Llanos orientales. Análisis de una toposecuencia representativa. Suelos Ecuatoriales. Vol. XII. N°2. p. 30-58.

- Mejia, C. L. (1985). Horizontes y características diagnosticas de la taxonomía de suelos del USDA. Centro interamericano de fotointerpretación. Bogotá, 246 p.
- Ministerio De Agricultura Y Desarrollo Rural. (2007). Estadísticas del sector agropecuario. Bogotá, julio 16.
- Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial E Instituto De Hidrologia, Meteorología Y Estudios Ambientales De Colombia (Ideam). (2005) Atlas climatológico de Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Montenegro, H & Malagon D. (1990). Propiedades físicas de los suelos. Inst. Geog. Ag. Codazzi. Subd. Agrol. Bogotá. p. 116-152.
- Moore D.M. & Reynolds R. C. (1989). X-ray difraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press. Oxford, N. York. p. 331.
- Moreno, F. & Lara W. Variación de carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. En Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. S. A.
- Nornberg, P., Sloth, L. & Nielsen. K. (1993). Rapid Changes of soils caused by vegetation changes. Can. j. Soils Sci. 73 p. 459-468.
- Orlov, D. S. (1986). Humus acids of soils. A. A. Balkema. Rotterdam. 378 p.
- Paramo, G. (1990) Ecología y corología de la vegetación colombiana (anotaciones preliminares). En: Colombia Geografica. IGAC. Junio, 1990, Vol. XVI, N° 1.
- Petersen R. G. & Calvin L. D. (1986). Sampling in Methods of Soil Analysis. Part. I. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph. N°9 (2nded) Am. Soc. of Agr. Soil.Sci. Soc. of Am. South Segoe Road. Madison. USA. p.33-52.
- Picolo. A. (1986). Soil humus in the tropics. Extraction and characterization. Land and Water 25. p. 16-19.
- Pulido C. & Marulanda J. (1968). Distribución geográfica de los minerales de la fracción arcilla en Suelos y Bosques de Colombia. IGAC, Subd. Agrol. Bogotá. p. 57-64.
- Requena B. J. (1993). Memorias del curso teórico sobre reología de suspensiones. U. Nal. Bogotá.
- Sarmiento G. (1984). The Ecology of Neotropical Savannas. Trad. Otto Solbrig. Harvard Univ. Press. Cambridge and London. 235 p.
- Sastriques, O. (1982). La Material Orgánica de los Suelos y el Humus de los Suelos de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Suelos. Ed. Academia. La Habana 136 p.

- Sawhney, B.L. (1986). Electron microprobe analysis in Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Agr. Monograph. N°9. (2nd ed.) Am. Soc. Of Agr. Soil. Sci. Soc. Of Am. p-271-290.
- Soil Survey Staff, (1992). Keys to Soil Taxonomy. Fifth Ed. SMSS Tech, Monogr. 19. Pocahontas Press inc. Blacksburg, Virginia. 541 p.
- Stevenson, F. (1982). Humus Chemistry. Genesis. Composition. Reaction. New York. Wiley. 443 p.
- Stevenson. Eliot. E. T. (1989). Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter. In Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. Ed. Coleman. Dades. Uehara. Univ. Hawaii Press. Honolulu. Hawaii. p. 173-199.
- Sudo, T., Shimoda, H., Yotsumoto & Aisa S. (1981). Electron micrographs of clay minerals. Developments in sedimentology, 31. Elsevier Scient. Publ. Comp. Kondasha. Ltd. Amsterdam, Oxford, N. York, Tokio. 68p.
- Tan, K. H., Hayek B. F. & Barsahd I. (1986). Termal analysis techniques in Methods of Soil analysis part. I. 2nd Ed. Agr. Monograph. Nr 9. Am. Soc. of Agr. Soil. Sci. Soc, of Am. Madison, Winsconsin, USA. p. 151-183.
- Thevenot, M., Dignac, M. F., & Rumpel, C. (2010). Fate of lignins in soils: A review. Soil Biology and Biochemistry, 42, 1200-1211.
- Thorez, J. (1986). The bases of clay geology (or argillogenesis) Liege State University. Fac. of. Sci. Provis. Edition. Liege. Belgica. 160 p.
- Useche, L. (1988). Zonas de Vida en Suelos y Bosques de Colombia. Inst. Geogr. Agustin Codazzi. Subd. Agrol. Bogotá. p. 13-20.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2010). Natural Resources Conservation Service. 2010. Keys to Soil Taxonomy by Soil Survey Staff. Eleventh Edition, 338p
- Wang, C., Kodoma, Miles N. (1981). Effect of various pretreatments on x-ray diffraction patterns of clay fractions of podzolic B. horizons. Can. Jour. Soil Sci. 61. P 311-316.
- Weaver, C.E. (1989). Clays muds and shales. developments in sedimentology. 44. Elsevier. Amsterdam, Oxford, New York, Tokio. 818 p.
- White, J. & Roth C.. (1986). Infrared spectrometry in the methods of soil analysis part I. Physical and mineralogical methods. Agr. Monograph. N° 9. (2nd Ed.). Am. Soc. of Agr. Soil Sc. Soc. of Am. 677. South Segoe Road, Madison, USA. p. 291-330.
- Whittig, L. & Allardice, W. (1986). X-ray diffraction techniques in methods of Soil Analysis Part I. Physical and mineralogical methods. Agr. Monograph. N°9. (2nd Ed.) Am. Soc. of Agr. Soil Sci. Soc. of Am. 677, South Segoe Road, Madison, USA. P. 331-362.
- Yepes, F. (2001) Ganadería Y Transformación De Ecosistemas: Un Análisis Ambiental De La Política De Aprobación Territorial. En: PALACIO, German, (Ed.). Naturaleza en

disputa. Ensayos de historia ambiental de Colombia 1850-1995. Universidad Nacional de Colombia – UNIJU. Bogotá, 2001.

Zunino, M & Zullini, A. (2003) Biogeografía. La dimensión espacial de la evolución. México: Fondo de Cultura Económica.







Capítulo 2
Justificación, Objetivos y Metodología



JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

1. Justificación

El departamento del Magdalena está situado en el extremo norte de Colombia, hace parte de la región del Caribe, con una extensión de 23188 km², que representan aproximadamente el 2% del territorio nacional y el 15% del área de la región Caribe colombiana. La región del departamento del Magdalena debe su nombre a la presencia y acción del río Magdalena, principal río Colombiano que naciendo a 3685 msnm en el páramo de las papas (macizo colombiano cordillera central), lleva sus aguas al Océano Atlántico en la zona de bocas de cenizas, tras haber realizado un curso de más de 1500 km de los cuales 375 km los recorre a lo largo del costado occidental del departamento depositando gran cantidad de sedimentos aluviales en su curso.

Los conflictos ambientales del recurso suelo en Colombia se originan, tanto por la propiedad desigual de la tierra, como por la utilización equivocada que se hace de ella en relación con su “vocación natural” y por los efectos que producen sobre sus propiedades las prácticas agropecuarias. Para el año 2001, el estudio del IGAC - CORPOICA indicaba que el 0,4% de los propietarios (15273) poseían el 61,2% del área predial rural registrada en Colombia, equivalente a 47147680 hectáreas, que en su totalidad corresponden a predios superiores a 500 ha, mientras que el 24,2% del área predial rural nacional (18646473 ha) se encuentra en manos del 97% de los propietarios registrados en el Catastro, dentro de los cuales predominan aquellos con predios menores de 3 ha (57%). De esta manera el cuadro general de las actividades agropecuarias en Colombia indica el predominio de la dupla latifundio:ganadería extensiva y una subsecuente aparición de minifundios:agricultura intensiva. Aunque los datos estadísticos no estén a disposición, se estima que en la mayor parte de los casos, la ganadería intensiva ocupa suelos con vocación predominantemente agrícola y, por el contrario, la agricultura de minifundio se enfrenta con suelos que presentan limitaciones fuertes en sus características fisicoquímicas internas y externas.

La región Caribe Colombiana presenta porcentajes de erosión en sus suelos que abarcan alrededor del 94% del territorio, lo cual refleja la gravedad del problema. La región presenta casi el 72% de su superficie total afectada por procesos erosivos moderados, altos, muy altos, porcentajes que expresan la severidad del problema. Gómez (*op. cit.*) indica que en el país el 94% del territorio nacional presenta susceptibilidad a la compactación de sus suelos,

fenómeno ligado a la pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica y exposición directa del suelo a la radiación solar generado principalmente por tránsito de maquinaria agrícola, uso de equipos pesados en suelos húmedos, moldeamientos causados por arados y rastras de disco y rotatorios, laboreo excesivo, sobrepastoreo, riego, quemas o por causas naturales (*clay-pans* u horizontes endurecidos subsuperficiales). El estudio del IGAC – CORPOICA reporta que las tierras con problemas de salinidad corresponden al 0,5% del territorio nacional, con una extensión de 585060 ha. No obstante, Pulido (2000) citado por Gómez (*op. cit.*) indica que aproximadamente 3038653 ha, presentan susceptibilidad a procesos de salinización en áreas de agricultura intensiva en la región Caribe. Este fenómeno se presenta en las planicies del Atlántico y Bolívar, zona de Ciénaga y Fundación, valles de los ríos Cesar y Ariguaní.

En el departamento del Magdalena, el clima ambiental puede considerarse como el factor formador más determinante de los suelos, ya que su acción no solo se traduce como causal diferenciador de ellos, sino que, en gran medida, define las plantas y los organismos presentes, sus cantidades, distribuciones y relaciones. Influye también, a través del agua efectiva, que, al pasar por los materiales edáficos, causa disolución, translocación, eliminación, reorganización mineralógica y redistribución de materiales tales como coloides y nutrientes. En la megacuenca de sedimentación el clima es cálido seco y pertenece en su gran mayoría a la formación bosque seco tropical; la vegetación imperante tiene poca influencia como factor formador de suelos debido a los pocos aportes de materia orgánica, por ser plantas de escaso y fino follaje; así mismo, las altas temperaturas aligeran los procesos de descomposición de los materiales orgánicos, por lo que su permanencia en el suelo es poco duradera. La precipitación y la temperatura son elementos del clima fundamentales en las reacciones químicas, en el incremento de la actividad microbiana y macrobial del suelo, en la transformación de materiales orgánicos y son los agentes responsables en gran parte, de la erosión y transporte de materiales, como también en la translocación de materiales edáficos dentro de los suelos (Malagón, 2003). La temperatura ambiental del área es alta, superior a 28 °C, lo cual influye en la actividad de la microfauna y la microflora como en la acumulación de materia orgánica del suelo. Actúa directamente en la velocidad con que se suceden las reacciones químicas del suelo y en la alteración física de los sedimentos depositados en toda la planicie.

En el sector litoral del departamento del Magdalena la precipitación presenta valores inferiores a los 400 mm anuales; de norte a sur del territorio magdalenense la precipitación aumenta hasta alcanzar los 1800 mm anuales en el área comprendida por los municipios de San Zenón, San Sebastián, Guamal y El Banco. En las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta la precipitación promedio multianual alcanza valores de 1300 mm, disminuyendo con la altitud hasta registrar valores de 600 mm. En los sectores norte y sur del departamento se registran los valores más altos de ETP, con totales anuales mayores a los 2000 mm. En el sector central del departamento la ETP fluctúa entre 1700 y 1900 mm. En las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta se presenta un régimen dominado por el efecto de la elevación. En este caso, los valores de ETP disminuyen desde 1400 al pie de la serranía, hasta menos de 500 mm en las partes más altas. Los sectores con déficit de humedad más altos están localizados en el sector norte del departamento, con valores superiores a 1350 milímetros anuales. En la parte central, el déficit hídrico fluctúa entre los 750 y 1050 milímetros anuales y en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta estos valores disminuyen hasta alcanzar un valor de 0.

Los aspectos ambientales asociados a las zonas de vida, generan limitados aportes de biomasa que repercuten en el contenido de materia orgánica de los suelos; en éste predominan los valores bajos (45% de los suelos con C.O.% entre 0,5 y 1,2), medianos (30% de los suelos entre 1,3 – 2,5 de C.O.%), muy bajos (< 0,5 de C.O.% en el 20% de los suelos). Los suelos con porcentajes altos de carbón orgánico (> 2,5) sólo incluyen el 5% de la región. A pesar del bajo contenido de materia orgánica (65% de los suelos), el humus evoluciona en condiciones de alternancia estacional de precipitación y temperaturas altas (los regímenes ústico y arídico abarcan el 65%), pH superiores a 5,6 (73% de los suelos), adecuadas bases de intercambio, condiciones bajas de saturación de Al (86.8% de los suelos con saturaciones inferiores al 30%) y predominancia de arcillas 2:1 (esmeclitas, vermiculita y micas) en el 70-75% de los suelos, en especial en la parte central de la región y en la Guajira.

Colombia emite el 0,25% de las emisiones globales de CO₂, el 45% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero provienen de la agricultura; el 9% de este total se produce por cambios en el uso de la tierra y forestales. Para el año 2050 se prevé: aumentos en la temperatura media anual del aire entre 1 °C y 2 °C; variaciones en la precipitación entre ±15%; desaparición del 78% de los nevados y del 56% de los páramos; ascensos del nivel de mar de aproximadamente 40 cm en la costa Caribe y de 60 cm en la costa Pacífica (IDEAM,

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006). El Departamento del Magdalena no es ajeno a esta realidad, máxime si es considerado por excelencia de vocación agropecuaria, con grandes extensiones de tierras productivas dedicadas a las actividades del sector agropecuario, así: 215512 ha dedicadas a la actividad agrícola, 79734 ha a la actividad agroforestal, 1219769 ha a la actividad pecuaria, 233815 ha a la actividad forestal y 416941 ha de conservación (IGAC, 2002).

En la Región Caribe y en general en Colombia poco se han evaluado almacenamientos de carbono de acuerdo con las variaciones en el paisaje, lo que es de gran importancia porque este elemento depende de condiciones específicas de cada sitio, requiriendo métodos de muestreo que permitan representar cambios a nivel local y del paisaje para la identificación de patrones de distribución (Leifeld *et al.*, 2005). Por otra parte, Batjes (2005) plantea que los agroecosistemas pueden ser manejados para reducir emisiones e incrementar depósitos de C, pero las opciones se deben escoger con base en el conocimiento de la magnitud de los almacenamientos edáficos de un bioma o región agroecológica, y la respuesta de los suelos a diferentes usos (Carvajal *et al.*, 2009).

Por lo anterior, en este trabajo se propuso iniciar la evaluación de las variaciones en los almacenamientos de C en sus distintas formas y mecanismos de estabilización considerando diferentes usos del suelo, localizados en seis zonas altitudinales del departamento del Magdalena, partiendo de la hipótesis que el CO en los suelos de esta región son afectados por los cambios en el uso del suelo, sin dejar de lado las pérdidas de C en suelos dedicados tradicionalmente a la agricultura intensiva.

2. Objetivos

General

Innovar en el estudio de la materia orgánica del suelo, caracterizando las diferentes formas y mecanismos de estabilización del Carbono en suelos con diferentes usos al norte del departamento del Magdalena (Colombia).

Específicos

- Describir la caracterización edafoclimática de las zonas objeto del estudio, para establecer las relaciones C-clima del suelo.

- Caracterizar la variabilidad de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas de los suelos estudiados y su clasificación taxonómica en los sistemas Keys to Soil Taxonomy (2010) y WRB (2006).
- Determinar las diferentes formas de Carbono: Carbono total (Ct), Carbono Oxidable (Cox), Carbono hidrolizable (Ch), Carbono extraíble con pirofosfato sódico (Cp), Carbono no Oxidable (Cnox) y cuantificar el efecto causado por el cambio de uso del suelo sobre los contenidos, distribución y formas de Carbono.
- Incrementar el conocimiento asociado con la respiración del suelo y su relación con las formas de Carbono estudiadas.
- Avanzar en estudios cualitativos de la materia orgánica de los suelos estudiados mediante métodos de fraccionamiento pirolítico.

3. Metodología

En este aparte se detallan los aspectos metodológicos comunes a la temática tratada en todos los capítulos; no obstante para cada capítulo se describe de manera específica la metodología utilizada.

3.1. Muestreo

La investigación edafológica se realizó en los municipios de: Santa Marta, Ciénaga (estribaciones de la sierra nevada), Zona Bananera, Dibulla y Aracataca, considerados a partir de estudios previos IGAC (2009), como los de mayor tradición y vocación agrícola, con la mayor área sembrada en cultivos de importancia económica al nor-orienté del departamento del Magdalena; localizados entre las coordenadas 11°36'58"-8°56'25" N, 73°32'50"-74°56'45"W (Figura 21).

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado, seleccionando seis zonas o estratos de muestreo ubicadas en el clima cálido entre 0 y 1000 msnm, rango altitudinal que involucra las condiciones climáticas óptimas para el normal desarrollo de los principales cultivos de importancia económica en el departamento del Magdalena, (zona 1 a 956 msnm; zona 2 a 42 msnm; zona 3 a 5 msnm; zona 4 a 15 msnm; zona 5 a 10 msnm y zona 6 a 7 msnm), diferenciados por el tipo de uso del suelo; en cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo; uno del cultivo de mayor importancia y el otro en área de vegetación de bosque natural; a excepción de la zona 4 donde se seleccionaron tres sitios (dos de cultivo y uno de bosque). En cada sitio se tomaron cuatro muestras de suelo de los horizontes superficiales (0-

20 cm de profundidad) compuestas por 10 submuestras recogidas aleatoriamente en el campo siguiendo los procedimientos de Brady y Weil (2002); ICA (1992). En total se tomaron 52 muestras de suelos para las determinaciones analíticas, con excepción a los análisis mineralógicos, disolución de equilibrio y pirolisis donde se trabajaron solo 13 muestras tomando solo una muestra por uso de suelo en cada zona.

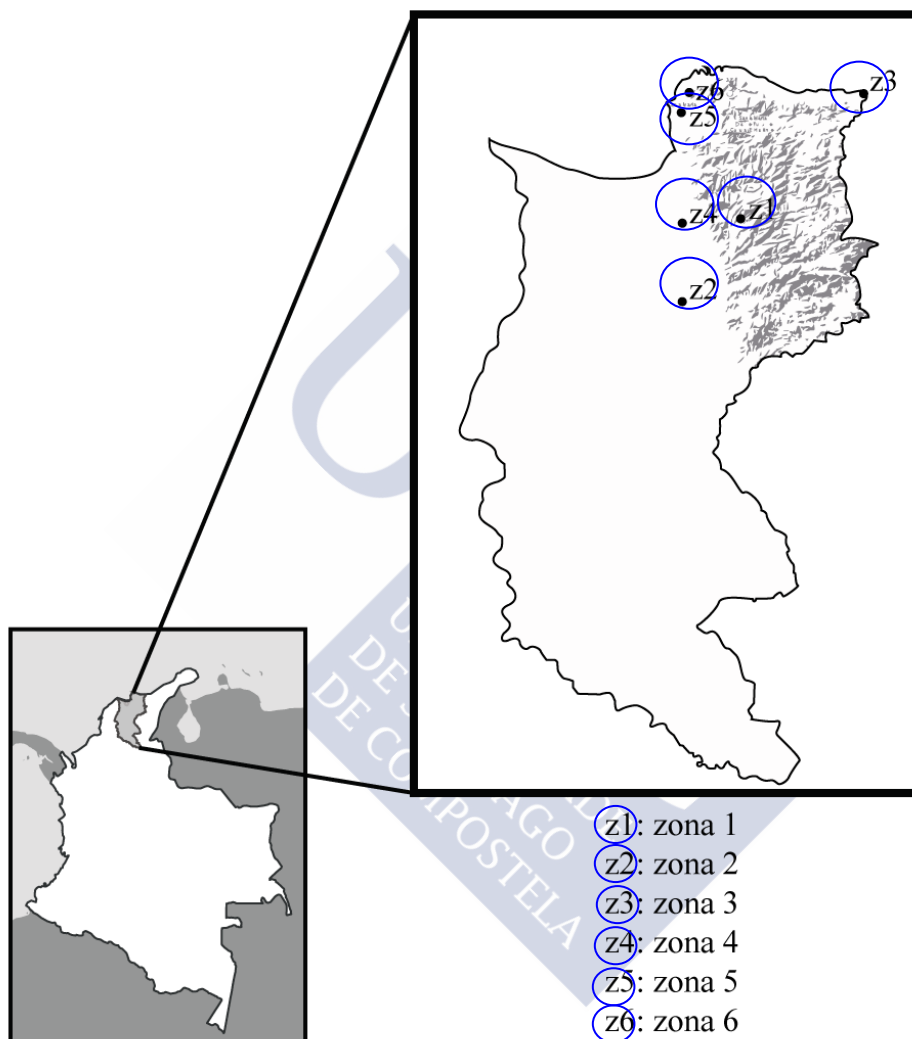


Figura 21. Ubicación de las zonas de muestreo. Fuente: Elaborado por (Ospino, 2013).

Características de los suelos muestreados en las diferentes zonas de estudio

La descripción de los suelos en cada zona que se detallada a continuación se realizó teniendo en cuenta el paisaje, clima ambiental, tipo de relieve y clasificación de los suelos según USDA (2010), WRB (2006) y IGAC (2009)

3.1.1. Zona 1

Usos del suelo: cultivo de Café (*Coffea arabica*) (Figura 2.a.) y bosque húmedo tropical (Figura 2.cb.), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 1. **Ubicación:** Vereda Kennedy, Municipio de Ciénaga en estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. 10°53'52.27''N y 74°05'09''W. **Altitud:** 956 msnm. **Clima:** Cálido húmedo, con temperatura media de 24 °C y una precipitación media de 2000 mm. **Paisaje:** Montaña. **Tipo de relieve:** filas-vigas y lomas, el relieve es fuertemente quebrado hasta moderadamente escarpado con pendientes de 12 a 75%. **Litología:** Los suelos se han originado de rocas metamórficas (neis y esquistos) y rocas ígneas (cuarzodioritas, granodioritas, cuarzomonzonitas). (IGAC, 2009). **Clasificación de los suelos:** (IGAC, 2009; Typic Eutrudepts. (Figura 2.c) (Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol háplico (WRB, 2006). Se ubican en las partes medias de las vertientes, sobre la ladera. Se caracterizan por ser muy profundos, bien drenados, de texturas medias y estructura en bloques subangulares finos y medios, débil a moderadamente desarrollados. La morfología del perfil consta de horizontes A-B-C. El horizonte superficial Ap tiene alrededor de 25 cm de espesor, color pardo amarillento, textura franca, estructura en bloques subangulares finos, débilmente desarrollados y consistencia friable; el segundo horizonte (Bw) tiene un espesor de 30 cm, color rojizo, textura franca, estructura en bloques subangulares, moderadamente desarrollados; el horizonte C es muy espeso, de color amarillo pardusco y textura franca.

De acuerdo con los análisis (Tabla 2) los suelos son ligeramente ácidos, incrementándose esta reacción con el cultivo. El contenido de C puede considerarse de tipo medio para la zona, si bien globalmente es bajo. El cultivo reduce el % de C en un 33% de su contenido inicial de C tanto total como oxidable y el del N en un 26%, mejorándose ligeramente la relación C/N. El contenido de P total es bajo, incrementándose con el cultivo, probablemente por los aportes realizados que, sin embargo, no impiden que la cantidad biodisponible sea menor, lo que puede explicarse por el efecto de su adsorción de P en compuestos de Fe y Al favorecido por el descenso del pH que origina el cultivo. También es bajo el contenido de S existente en ambos tipos de usos del suelo. La relación C:N:P:S para los suelos con vegetación natural es de 66:5:1:1 mientras que en los de cultivo de café es 48:4:2:1, poniendo de manifiesto el efecto de reducción del C, y, en menor medida, del N causado por el cultivo del café. De los cationes cambiabiles se aprecia el efecto del cultivo manifestado en el descenso del Ca (19% del existente en el suelo de vegetación natural y de

Mg (13%), manteniéndose prácticamente iguales los niveles de Na y K. En cambio, este efecto no se observa en los niveles totales para los que el suelo cultivado contiene mayores concentraciones de Mg y K.

Los datos de la capacidad de intercambio catiónico, con una capacidad efectiva entre 12 y 18 cmol+ kg⁻¹ de suelo, que puede considerarse como moderada, ponen de manifiesto que los cationes dominantes son Ca y Mg y que no hay riesgo de degradación por Na. Este resultado parece sorprendente, porque con una precipitación del orden de 2000 mm y un régimen de humedad údico, parecería lógico encontrar un lavado más intenso y una cierta acidificación, pero es posible que la remontada biológica producida por la vegetación junto con la importancia de la evapotranspiración (990 mm) sea capaz de mantener niveles altos de cationes evitando o mitigando la acidificación de los horizontes superficiales.

Genéticamente, los suelos tienen un bajo grado de evolución. Son suelos ABC, profundos, pero su epipedón es ócrico y su endopedón cámbico, por lo que se clasifican en el subgrupo Typic Eutrudepts (Soil Taxonomy, 1996) y como Cambisol háplico (WRB, 2006).

Las principales limitantes para el uso productivo de estos suelos, deducidos de las observaciones de campo y de los datos analíticos, son las fuertes pendientes que propician los procesos erosivos y, en menor medida, el bajo porcentaje de materia orgánica que limita la resistencia frente a la erosión, mientras que el resto de los parámetros químicos relacionados con la fertilidad son adecuados o al menos moderados para un objetivo productivo.

Tabla 21. Especies vegetales características en el bosque de la zona 1.

Familia	Especie
BORAGINACEAE	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken
BORAGINACEAE	<i>Cordia spinescens</i> L.
CANNABACEAE	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume
CLUSIACEAE	<i>Clusia multiflora</i> Kunth
EUPHORBIACEAE	<i>Croton bogotanus</i> Cuatrec.
HELICONIACEAE	<i>Heliconia bihai</i> (L.) L.
HYPERICACEAE	<i>Vismia baccifera</i> (L.) Planch. & Triana
LAURACEAE	<i>Aiouea costaricensis</i> (Mez) Kosterm.

Familia	Especie
LAURACEAE	<i>Persea caerulea</i> (Ruiz & Pav.) Mez
LECYTHIDACEAE	<i>Gustavia verticillata</i> Miers
LEGUMINOSAE	<i>Acacia riparia</i> Kunth
LEGUMINOSAE	<i>Inga sapindoides</i> Willd.
LEGUMINOSAE	<i>Mimosa albida</i> Willd.
MALPIGHIACEAE	<i>Bunchosia argentea</i> (Jacq.) DC.
MALVACEAE	<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth
MALVACEAE	<i>Trichospermum galeottii</i> (Turcz.) Kosterm.
MELASTOMATACEAE	<i>Meriania longifolia</i> (Naudin) Cogn.
MELASTOMATACEAE	<i>Tibouchina longifolia</i> (Vahl) Baill.
MORACEAE	<i>Ficus tonduzii</i> Standl.
MORACEAE	<i>Poulsenia armata</i> (Miq.) Standl.
PHYLLANTHACEAE	<i>Hieronyma fendleri</i> Briq.
PIPERACEAE	<i>Piper aduncum</i> L.
PIPERACEAE	<i>Piper cernuum</i> Vell.
POACEAE	<i>Lasiacis procerrima</i> (Hack.) Hitchc. ex Chase
PRIMULACEAE	<i>Cybianthus iteoides</i> (Benth.) G.Agostini
PRIMULACEAE	<i>Parathesis serrulata</i> (Sw.) Mez
URTICACEAE	<i>Urera caracasana</i> (Jacq.) Gaudich. ex Griseb.



Figura 22. Sitios de Muestreo Zona 1. (a) Cultivo (Café), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo. Fuente: (c) (IGAC, 2009).

Tabla 22. Propiedades físico-químicas de los suelos en la zona 1.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	10YR 3/4	10YR 3/2
Da (g cm⁻³)	1,49	1,4
% Arena	40,7	65,4
% Arcilla	21,0	23,2
% Limo	38,3	11,4
pH (H₂O)	5,6	6,5
N total (%)	0,23	0,31
C total (%)	2,61	3,90
C ox (%)	2,57	3,85
C/N	11,4	12,4
P olsen (ppm)	7,98	10,53
P total (ppm)	1030,6	596,3
S (ppm)	539,43	593,95
Ca⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	11,2	13,9
Ca total (cmol(+)kg⁻¹)	75,7	107,6
Mg⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	3,3	3,8
Mg total (cmol(+)kg⁻¹)	120,5	99,1
K⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,2	0,2
K total (cmol(+)kg⁻¹)	20,9	13,9
Na⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,1	0,0
Na total (cmol(+)kg⁻¹)	0,6	0,7
CICE (cmol(+)kg⁻¹)	14,8	18,0
CIC (cmol(+)kg⁻¹)	15,0	18,4

3.1.2. Zona 2

Usos del suelo: Cultivo de Palma Africana (*Elaeis guineensis Jacq.*) (Figura 3a) y Bosque seco tropical (Figura 3b), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 3. **Ubicación:** municipio de Aracataca. 10°32'00"N y 74°10'09"W. **Altitud:** 42 msnm. **Clima:** Cálido seco, con temperatura media de 28,4 °C y una precipitación media de 1200 mm año. **Paisaje:** Planicie. **Tipo de relieve:** planos de inundación y terrazas aluviales, donde se incluyen diques, orillares, cubetas y napas de desborde, como también los diferentes niveles de terrazas presentes en el paisaje aluvial; se encuentran lagunas, ciénagas y cauces abandonados; en época de invierno se presentan frecuentes inundaciones y encharcamientos. El relieve es plano a moderadamente inclinado con pendientes inferiores a 12%; están afectados por erosión hídrica laminar en grado ligero a

severo. Litología: El origen de los suelos está dado por los aportes aluviales principalmente de los ríos que descienden de la Sierra Nevada como el Fundación, Ariguaní, Tucurinca, Sevilla y Aracataca. **Clasificación de los suelos:** Typic Ustifluvents (IGAC, 2009; Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Fluvisol háplico (WRB, 2006) (Figura 3c). Se localizan en los planos de las terrazas; se han derivado de aluviones mixtos; son suelos profundos, bien drenados, de texturas gruesas y moderadamente gruesas. El perfil modal es de tipo A-C. El horizonte superficial es de colores pardo pálido, pardo amarillento oscuro y pardo oscuro, espesor de 25 a 45 cm, con texturas arenosas y franco arenosas, estructura en bloques subangulares medios, débilmente desarrollados y algunos sin estructura (suelta). Los subhorizontes que integran el horizonte C, son de colores pardo amarillento claro, amarillo pálido, pardo amarillento oscuro, pardo oscuro, amarillo pardusco y gris claro; la textura es arenosa, arenosa franca y franco arcillo arenosa y carecen de estructura.

A pesar de que la heterogeneidad de los materiales existentes en las diferentes zonas del área de inundación no permiten hacer cálculos representativos parece que el suelo de cultivo tienen un pH algo más elevado, pero dentro del contexto neutro, y menores porcentajes de C, N, P y S total. En cambio, el P disponible es mucho más alto en el suelo de cultivo, probablemente por el efecto de mejora del pH (más próximo a la neutralidad). En todo caso los valores del % de C son muy bajos (1,6 y 1,3%) poniendo de manifiesto el importante efecto de mineralización de la materia orgánica que ejercen las condiciones climáticas. En cuanto a los cationes son mucho más elevados los contenidos totales y cambiables en el suelo de vegetación natural que en el cultivado, lo que podría explicarse por el efecto extractivo del cultivo, pero también debe tenerse en cuenta la fuerte heterogeneidad que pueden inducir los diferentes aportes aluviales (Tabla 4).

La principal limitación para el cultivo se relaciona con el régimen de inundaciones y, en menor medida, con el efecto de baja estructuración de los suelos que debe relacionarse con su escaso contenido de C que, en principio parece relacionarse más con las características climáticas y la naturaleza predominantemente inorgánica de los aportes aluviales, pues aparecen bajos valores tanto en suelos con vegetación natural como en los cultivados, pero también pudiera ser el efecto de actuaciones antrópicas anteriores generalizadas en la zona. En cualquier caso, para mejorar sus propiedades físicas conviene estimular la acumulación y estabilización de mayores contenidos de C y N.

Capítulo 2. Justificación, Objetivos y Metodología

Tabla 23. Especies vegetales características en el bosque de la zona 2.

Familia	Especie
BIGNONIACEAE	<i>Adenocalymma inundatum</i> Mart. ex DC.
BIGNONIACEAE	<i>Bignonia aequinocialis</i> L.
BIGNONIACEAE	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & K.Schum.) S.O.Grose
BIGNONIACEAE	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A.DC.
CONVOLVULACEAE.	<i>Ipomoea triloba</i> L.
LEGUMINOSAE	<i>Acacia polyphylla</i> DC.
LEGUMINOSAE	<i>Acacia riparia</i> Kunth
LEGUMINOSAE	<i>Acacia tortuosa</i> (L.) Willd.
LEGUMINOSAE	<i>Albizia saman</i> (Jacq.) Merr.
LEGUMINOSAE	<i>Bauhinia glabra</i> Jacq.
LEGUMINOSAE	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.
LEGUMINOSAE	<i>Piptadenia flava</i> (DC.) Benth.
LEGUMINOSAE	<i>Senna obtusifolia</i> (L.) H.S.Irwin & Barneby
LEGUMINOSAE	<i>Senna occidentalis</i> (L.) Link
LEGUMINOSAE	<i>Zapoteca formosa</i> (Kunth) H.M.Hern.
MALPIGHIACEAE	<i>Stigmaphyllon dichotomum</i> (L.) Griseb.
MALPIGHIACEAE	<i>Tetrapteryx discolor</i> (G.Mey.) DC.
MALVACEAE	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.
MALVACEAE	<i>Melochia parvifolia</i> Kunth
POACEAE	<i>Panicum maximum</i> Jacq.
POACEAE	<i>Paspalum virgatum</i> L.
RUBIACEAE	<i>Chomelia spinosa</i> Jacq.
RUBIACEAE	<i>Coutarea hexandra</i> (Jacq.) K.Schum.
RUBIACEAE	<i>Hamelia patens</i> Jacq.
VERBENACEAE	<i>Lantana camara</i> L.

Tabla 24. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 2.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	2.5YR 3/3	10YR 3/3
Da (g cm⁻³)	1,4	1,33
% Arena	62,1	20,3
% Arcilla	22,8	41,1
% Limo	15,1	38,6
pH (H₂O)	6,3	5,6
N total (%)	0,12	0,17
C total (%)	1,34	1,64
C ox (%)	1,31	1,62

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
C/N	11,1	9,7
P olsen (ppm)	28,93	13,40
P total (ppm)	123,8	156,1
S (ppm)	341,06	688,95
Ca ⁺² (cmol(+)kg ⁻¹)	3,9	15,8
Ca total (cmol(+)kg ⁻¹)	11,5	23,0
Mg ⁺² (cmol(+)kg ⁻¹)	1,8	10,8
Mg total (cmol(+)kg ⁻¹)	9,2	55,9
K ⁺ (cmol(+)kg ⁻¹)	0,4	0,6
K total (cmol(+)kg ⁻¹)	3,2	16,9
Na ⁺ (cmol(+)kg ⁻¹)	0,0	0,6
Na total (cmol(+)kg ⁻¹)	0,4	4,0
CICE (cmol(+)kg ⁻¹)	6,1	27,8
CIC (cmol(+)kg ⁻¹)	6,4	28,4



Figura 23. Sitio de muestreo Zona 2. (a) Cultivo (Palma Africana), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo. Fuente: (c) (IGAC, 2009).

3.1.3. Zona 3

Usos del suelo: suelo arado para la siembra de Banano Orgánico (Figura 4a) y bosque seco tropical (Figura 4b), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 5. **Ubicación:** corregimiento las flores, municipio de Dibulla. 11°16'41.2''N y 73°11'01''W. **Altitud:** 5 msnm. **Clima:** cálido seco, con temperatura media de 27 °C y una precipitación media de 1245 mm. **Paisaje:** planicie. **Tipo de relieve:** relieve plano de marea y terrazas, el relieve es plano a ligeramente inclinado con pendientes de 3 - 7%. **Litología:** depósitos superficiales clásticos, hidrogénicos mixtos. **Clasificación de los suelos:** son suelos de baja evolución edafogenética, presentando epipedón ocrico, endopedón cámbico, régimen de humedad ústico, saturación de bases mayor de 60%, y decrecimiento irregular de carbón orgánico, características que los llevan a incluir en los Fluventic Haplustepts (IGAC, 2009; Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluventico endogleyico (WRB, 2006) (Figura 4c). Se encuentran localizados en las napas de explayamiento de las terrazas. Se han derivado de depósitos transportados por el agua; son moderadamente profundos, limitados por la fluctuación del nivel freático, moderadamente bien drenados, de texturas moderadamente finas, fertilidad muy alta. Morfológicamente, el perfil de suelos presenta una secuencia de horizontes Ap-Bw1-Bw2 -Bw3-C. El horizonte Ap tiene 20 cm de espesor, color pardo grisáceo, textura franco-arcillosa, estructura en bloques subangulares medios, moderados. El horizonte Bw1 tiene 15 cm de espesor, color pardo, con manchas pardo amarillentas pequeñas, regulares, claras; textura arcillosa, estructura en bloques subangulares medios, moderados. El horizonte Bw2 tiene 22 cm de espesor, color pardo con manchas pardo amarillentas pequeñas, regulares, claras, textura franco-arcillosa, estructura en bloques subangulares medios, moderados. El horizonte Bw3 tiene 21 cm de espesor, color pardo amarillento y pardo grisáceo oscura, textura franco-arcillo limosa, estructura en bloques subangulares, medios, moderados. El horizonte C tiene 35 cm de espesor, color gris oscuro con manchas pardas amarillentas medias regulares, claras, textura franco-arcillo limosa, sin estructura.

Los datos analíticos (Tabla 6) existentes en esta zona indican que se trata de suelos de reacción neutra, bases totales medias, capacidad de intercambio catiónico media, saturación de bases alta y bajo contenido de carbón orgánico, probablemente producido por las condiciones climáticas y la naturaleza de los aportes hídricos. Al igual que en el caso anterior las relaciones entre los suelos pueden estar muy condicionadas por la heterogeneidad de los materiales aluviales que se depositan en cada zona. Si se hace abstracción de esto, el cultivo

induce un descenso del 26% del contenido de C de la vegetación natural, manteniéndose aproximadamente constantes los niveles de N, P y elementos básicos y con un pequeño incremento de S en el cultivo. La reacción es neutra en ambos casos y el principal limitante productivo parece ser la escasa estructura relacionada con el bajo contenido de materia orgánica y las limitaciones que pueda inducir en algunas plantas la existencia de episodios de nivel freático elevado o de encharcamiento superficial y, también, la excesiva duración de los períodos secos, si bien esto estaría parcialmente compensado por la proximidad del nivel freático a los sistemas radiculares.

Tabla 25. Especies vegetales características en el bosque de la zona 3.

Familia	Especie
ANACARDIACEAE	<i>Anacardium excelsum</i> (Bertero ex Kunth) Skeels
ANACARDIACEAE	<i>Spondias mombin</i> L.
APOCYNACEAE	<i>Aspidosperma desmanthum</i> Benth. ex Müll.Arg.
ARECACEAE	<i>Attalea butyracea</i> (Mutis ex L.f.) Wess.Boer
ARECACEAE	<i>Sabal mauritiiformis</i> (H.Karst.) Griseb. & H.Wendl.
CAPPARACEAE	<i>Crateva tapia</i> L.
EUPHORBIACEAE	<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong
LAMIACEAE	<i>Vitex cymosa</i> Bertero ex Spreng.
LAURACEAE	<i>Aiouea costaricensis</i> (Mez) Kosterm.
LAURACEAE	<i>Nectandra turbacensis</i> (Kunth) Nees
LEGUMINOSAE	<i>Acacia tortuosa</i> (L.) Willd.
LEGUMINOSAE	<i>Bauhinia guianensis</i> var. <i>splendens</i> (Kunth) Amshoff
LEGUMINOSAE	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.
LEGUMINOSAE	<i>Pterocarpus acapulcensis</i> Rose
MALPIGHIACEAE	<i>Mascagnia macradena</i> (DC.) Nied.
MALVACEAE	<i>Luehea seemannii</i> Triana & Planch
MALVACEAE	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H.Karst.
MORACEAE	<i>Ficus insipida</i> Willd.
MORACEAE	<i>Ficus tonduzii</i> Standl.
MORACEAE	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D.Don ex Steud.
RHAMNACEAE	<i>Gouania polygama</i> (Jacq.) Urb.
SAPOTACEAE	<i>Pradosia colombiana</i> (Standl.) T.D.Penn. ex T.J.Ayers & Boufford
URTICACEAE	<i>Cecropia peltata</i> L.



Figura 24. Sitio de muestreo Zona 3. (a) Suelo Arado, (b) Bosque y (c) Perfil del suelo. Fuente: (c) (IGAC, 2009).

Tabla 26. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 3.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	2.5YR 3/3	10YR 3/6
Da (g cm⁻³)	1,25	1,19
% Arena	34,2	49,0
% Arcilla	45,7	21,0
% Limo	20,1	29,9
pH (H₂O)	6,5	7,0
N total (%)	0,13	0,13
C total (%)	1,28	1,72
C ox (%)	1,15	1,64
C/N	9,8	11,7
P olsen (ppm)	32,03	32,03
P total (ppm)	376,2	352,7

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
S (ppm)	679,44	487,83
Ca ⁺² (cmol(+)kg ⁻¹)	9,3	9,3
Ca total (cmol(+)kg ⁻¹)	99,3	101,3
Mg ⁺² (cmol(+)kg ⁻¹)	5,1	6,0
Mg total (cmol(+)kg ⁻¹)	95,4	82,2
K ⁺ (cmol(+)kg ⁻¹)	0,3	0,2
K total (cmol(+)kg ⁻¹)	11,9	7,9
Na ⁺ (cmol(+)kg ⁻¹)	0,3	0,6
Na total (cmol(+)kg ⁻¹)	2,3	2,7
CICE (cmol(+)kg ⁻¹)	15,0	16,1
CIC (cmol(+)kg ⁻¹)	15,6	16,2

3.1.4. Zona 4

Usos del suelo: cultivos de banano y mango (Figura 5a y 5b) y bosque seco tropical (Figura 5b), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 4. **Ubicación:** Sector la Aguja, Municipio Zona Bananera, 10°57'06''N y 74°12'48.19''W. **Altitud:** 15 msnm. **Clima:** Cálido seco, con temperatura media de 27 °C y una precipitación media de 750 mm. **Paisaje:** Planicie aluvial. **Tipo de relieve:** planos de inundación donde se incluyen diques, orillares, cubetas y napas de desborde, como también los diferentes niveles de terrazas presentes en el paisaje aluvial, así como planos de marea y terrazas de influencia marina. Se encuentran lagunas, ciénagas y cauces abandonados; en época de invierno se presentan frecuentes inundaciones y encharcamientos. El relieve es plano a moderadamente inclinado con pendientes inferiores a 12%; están afectados por erosión hídrica laminar en grado ligero a severo. El origen de los suelos está dado por los aportes aluviales de los principales ríos que descienden de la Sierra Nevada y, además, por la influencia marina. **Litología:** El material original de estos suelos corresponde a sedimentos aluviales medios, que dan como resultado suelos profundos, bien drenados, texturas medias, moderadamente gruesas a moderadamente finas, alta saturación de bases y fertilidad natural alta a moderada. **Clasificación de los suelos:** Typic Haplusteps (Figura 5.d.) (IGAC, 2009), (Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluvéntico endogleyico (WRB, 2006). Estos suelos se ubican en los planos de las terrazas. Se han desarrollado depósitos aluviales medios bien drenados, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas y estructura en bloques subangulares finos a gruesos, de moderado desarrollo.

El perfil modal presenta una secuencia de horizontes A-B-C. El horizonte A tiene alrededor de 30 cm de espesor, color pardo grisáceo muy oscuro, textura franco arcillo-arenosa, estructura en bloques subangulares medios y gruesos, moderados; el segundo horizonte (Bw) tiene aproximadamente 40 cm de espesor, color pardo grisáceo oscuro, textura franco arcillosa, estructura en bloques subangulares finos y medios, moderadamente desarrollados; el último horizonte, el C, que profundiza hasta 135 cm, se subdivide en un C de color pardo amarillento, textura franca y sin estructura (suelta) y un Cg con evidencias de mal drenaje, de color pardo pálido y gris azulado, textura franca y sin estructura (suelta).

Los análisis (Tabla 8) indican que estos suelos son de reacción neutra a alcalina; el contenido de bases totales es medio; calcio alto y magnesio medio; la saturación de bases alta; el carbón orgánico es medio para la zona en el primer horizonte y muy bajo en los siguientes, pero en una escala global debe considerarse que el % de C es excesivamente bajo; la fertilidad natural es alta; estos suelos evidencian procesos de compactación e impedimento a la entrada del agua, debido a la alta densidad aparente ($> 1,4\text{g/cm}^3$); esta alta densidad aparente da como resultado una porosidad total media (38%); hay predominio de la microporosidad con valores que varían entre el 33 y 39%, considerada como adecuada y una baja macroporosidad con valores menores al 9%; por su parte la retención de humedad o agua aprovechable es media (20 al 30%).

En este caso, el cultivo no parece inducir apenas modificaciones respecto al suelo natural, pues se encuentran valores similares para C, N, S, Ca, Mg, Na, CICE y solo se manifiesta un contenido total de P mucho más alto en el cultivo que, sin embargo, no tiene su reflejo en la disponibilidad de este nutriente.

Las limitaciones de este tipo de suelo para las actividades productivas están fundamentalmente relacionadas con la carencia de C, que dificulta la formación de estructura estable, la excesiva densidad y tendencia al empaquetamiento y, quizás las consecuencias que esto y su posición topográfica tienen en la aireación del sistema radicular.

Tabla 27. Especies vegetales características en el bosque de la zona 4.

Familia	Especie
ACANTHACEAE	<i>Ruellia tuberosa</i> L.
ANACARDIACEAE	<i>Anacardium excelsum</i> (Bertero ex Kunth) Skeels
ANACARDIACEAE	<i>Spondias mombin</i> L.

Familia	Especie
ANACARDIACEAE	<i>Spondias mombin</i> L.
ASTERACEAE	<i>Wedelia symmetrica</i> Rusby
BIGNONIACEAE	<i>Fridericia dichotoma</i> (Jacq.) L.G.Lohmann
BORAGINACEAE	<i>Cordia alba</i> (Jacq.) Roem. & Schult.
BORAGINACEAE	<i>Heliotropium angiospermum</i> Murray
CLEOMACEAE	<i>Cleome spinosa</i> Jacq.
CUCURBITACEAE	<i>Cayaponia glandulosa</i> (Mart.) Cogn.
CUCURBITACEAE	<i>Melothria pendula</i> L.
EUPHORBIACEAE	<i>Acalypha alopecuroides</i> Jacq.
EUPHORBIACEAE	<i>Astraea lobata</i> (L.) Klotzsch
LEGUMINOSAE	<i>Acacia polyphylla</i> DC.
LEGUMINOSAE	<i>Centrosema pubescens</i> Benth.
LEGUMINOSAE	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.
LEGUMINOSAE	<i>Senna obtusifolia</i> (L.) H.S.Irwin & Barneby
MALPIGHIACEAE	<i>Stigmaphyllon dichotomum</i> (L.) Griseb.
MALVACEAE	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.
MALVACEAE	<i>Melochia parvifolia</i> Kunth
MALVACEAE	<i>Pseudabutilon umbellatum</i> (L.) Fryxell
MALVACEAE	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H.Karst.
POACEAE	<i>Panicum maximum</i> Jacq.
SAPINDACEAE	<i>Sapindus saponaria</i> L.
VERBENACEAE	<i>Lantana camara</i> L.



Figura 25. Sitio de muestreo Zona 4. (a) Cutivo banano (b) Cutivo mango, (c) Bosque y (d) Perfil del suelo. Fuente: (d) (IGAC, 2009).

Tabla 28. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 4.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	10YR 3/2	2.5YR 3/2
Da (g cm⁻³)	1,57	1,46
% Arena	45,3	49,1
% Arcilla	34,2	20,9
% Limo	20,5	30,1
pH (H₂O)	7,1	7,8
N total (%)	0,17	0,15
C total (%)	1,84	1,76
C ox (%)	1,74	1,63
C/N	11,0	12,0
P olsen (ppm)	18,83	19,07
P total (ppm)	3241,7	1482,5
S (ppm)	479,92	479,92
Ca⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	11,0	9,4
Ca total (cmol(+)kg⁻¹)	93,9	101,7
Mg⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	3,5	4,1
Mg total (cmol(+)kg⁻¹)	108,1	95,4
K⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,2	0,2
K total (cmol(+)kg⁻¹)	25,2	18,6
Na⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,3	0,4
Na total (cmol(+)kg⁻¹)	3,2	2,9
CICE (cmol(+)kg⁻¹)	15,0	14,1
CIC (cmol(+)kg⁻¹)	15,4	14,6

3.1.5. Zona 5

Usos del suelo: cultivo de frutales (Figura 6a) y bosque seco tropical (Figura 6b), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 9.

Ubicación: Granja del SENA Agropecuario, municipio de Santa Marta. Entre los 11°11'-11°15N y 74°07'-74°12'W. **Altitud:** 10 msnm. **Clima:** cálido seco, con temperatura media de 30 °C y una precipitación media de 880 mm.

Paisaje: Planicie Fluvio Marina. **Tipo de relieve:** planos de marea de la planicie fluviomarina; el relieve es ligeramente plano, con pendientes de 1 a 3%; hay inundaciones ocasionales de corta duración.

Litología: El material parental que origina estos suelos está constituido por sedimentos fluviomarinos, que dan como resultado suelos moderadamente profundos, imperfecta y moderadamente bien drenados, de texturas gruesas, moderadamente gruesas y moderadamente finas; reacción moderadamente alcalina; alta saturación de bases y fertilidad natural alta.

Clasificación de los suelos:

Fluventic Haplustepts (IGAC, 2009; Keys to Soil Taxonomy, 2010) y Cambisol fluventico endogleyico (WRB, 2006) (Figura 6c). Se ubican en la napa de explayamiento del plano de marea. Son moderadamente profundos, limitados por un horizonte compacto y duro, imperfectamente drenados, texturas moderadamente gruesas y estructura granular débil y en bloques subangulares finos a medios, de moderado desarrollo.

El perfil presenta una secuencia de horizontes A-B-C. El horizonte A tiene textura franco arenosa, estructura granular media, moderada; el horizonte B tiene aproximadamente 76 cm de espesor, es de color pardo grisáceo oscuro, textura franco arenosa y estructura en bloques subangulares finos y medios, moderadamente desarrollados; el último horizonte un C, se subdivide en C1 de color blanco, textura arenosa y sin estructura (suelta), y C2 con evidencias de mal drenaje o gleyizado de color gris oscuro, textura franco arcillo limosa y sin estructura (masiva).

Los análisis (Tabla 10) indican que son de reacción neutra a ligeramente alcalina; el contenido de bases totales es medio a bajo; el de calcio y magnesio medio; la saturación de bases alta; el carbón orgánico es medio en el primer horizonte y muy bajo en los siguientes y la fertilidad natural alta. Dada la gran heterogeneidad que inducen los procesos aluviales las comparaciones entre las zonas cultivadas y no cultivadas deben ser consideradas con cierta prudencia, pero sí parece que hay una gran diferencia en el contenido de C y N que parecen representar valores muy elevados de hasta el 60% del C y del 48% del N en el suelo cultivado con frutales. Estas cifras de pérdida parecen excesivas para el contexto climático, pero podrían estar relacionadas con las modificaciones de localización de la materia orgánica causadas por el laboreo previo a la plantación de los frutales. Destaca también el hecho de que el suelo cultivado contiene más P total, pero menos disponible y menos S total sin que se aprecien cambios en la reacción del suelo que, en ambos casos es neutra. Son suelos de una escasa evolución genética presentando un endopedón cámbico, decrecimiento irregular de carbón orgánico y saturación de bases mayor de 60%. Las principales limitaciones para el uso son la deficiencia en C en el suelo con frutales, la fuerte tendencia a la compactación y, probablemente la escasa aireación de la zona radicular.

Tabla 29. Especies vegetales características en el bosque de la zona 5.

Familia	Especie
AMARANTHACEAE	<i>Amaranthus dubius</i> Mart. ex Thell.
ANACARDIACEAE	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.

Capítulo 2. Justificación, Objetivos y Metodología

Familia	Especie
ASTERACEAE	<i>Wedelia symmetrica</i> Rusby
BIGNONIACEAE	<i>Bignonia pterocalyx</i> (Sprague ex Urb.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Dolichandra unguis-cati</i> (L.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Fridericia dichotoma</i> (Jacq.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Fridericia pubescens</i> (L.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & K.Schum.) S.O.Grose
BURSERACEAE	<i>Bursera graveolens</i> (Kunth) Triana & Planch.
CAPPARACEAE	<i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J.Presl
CONVOLVULACEAE	<i>Merremia umbellata</i> (L.) Hallier f.
ERYTHROXYLACEAE	<i>Erythroxylum havanense</i> Jacq.
EUPHORBIACEAE	<i>Croton fragilis</i> Kunth
LEGUMINOSAE	<i>Machaerium biovulatum</i> Micheli
LEGUMINOSAE	<i>Platymiscium pinnatum</i> (Jacq.) Dugand
LEGUMINOSAE	<i>Senna obtusifolia</i> (L.) H.S.Irwin & Barneby
LEGUMINOSAE	<i>Zapoteca formosa</i> (Kunth) H.M.Hern.
MALPIGHIACEAE	<i>Stigmaphyllon dichotomum</i> (L.) Griseb.
MALVACEAE	<i>Melochia parvifolia</i> Kunth
NYCTAGINACEAE	<i>Pisonia aculeata</i> L.
SAPINDACEAE	<i>Paullinia macrophylla</i> Kunth



Figura 26. Sitio de muestreo Zona 5. (a) Cutivo (frutales), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo. Fuente: (c) (IGAC, 2009).

Tabla 30. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 5.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	2.5YR 3/2	10YR 3/2
Da (g cm⁻³)	1,43	1,35
% Arena	65,7	70,7
% Arcilla	18,5	15,5
% Limo	15,8	13,8
pH (H₂O)	7,1	7,1
N total (%)	0,13	0,25
C total (%)	1,28	3,26
C ox (%)	1,15	3,22
C/N	10,2	12,5
P olsen (ppm)	29,71	35,68
P total (ppm)	963,1	745,9
S (ppm)	422,45	697,96
Ca⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	6,9	13,1
Ca total (cmol(+)kg⁻¹)	49,5	46,9
Mg⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	1,6	4,0
Mg total (cmol(+)kg⁻¹)	54,3	61,7
K⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,3	0,2
K total (cmol(+)kg⁻¹)	12,4	14,1
Na⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,1	0,3
Na total (cmol(+)kg⁻¹)	2,7	2,0
CICE (cmol(+)kg⁻¹)	8,9	17,7
CIC (cmol(+)kg⁻¹)	9,4	18,4

3.1.6. Zona 6

Usos del suelo: cultivo de hortalizas (Figura 7a) y bosque muy seco tropical (Figura 7b), cuyas especies vegetales predominantes en el área de muestreo se detallan en la Tabla 11.

Ubicación: Granja Experimental de la Universidad del Magdalena, Municipio de Santa Marta. Entre (74° 07' Y 74° 12' W y 11° 11' y 11° 15' N).

Altitud: 7 msnm. **Clima:** Cálido seco, con temperatura media de 28 °C y una precipitación media de 663 mm.

Paisaje: Planicie Fluvio Marina. **Tipo de relieve:** planos de marea de la planicie fluviomarina; el relieve es ligeramente plano, con pendientes de 1 a 3%; hay inundaciones ocasionales de corta duración. **Litología:** El material original de estos suelos está constituido por sedimentos fluviomarinos, que dan como resultado suelos moderadamente profundos, imperfecta y moderadamente bien drenados, de texturas gruesas, moderadamente gruesas y moderadamente finas; reacción moderadamente alcalina; alta saturación de bases y fertilidad

natural alta. **Clasificación de los suelos:** Typic Ustipsamments (IGAC, 2009; Keys to Soil Taxonomy, 2010) y (WRB, 2006) (Figura 7.c.). Para la clasificación taxonómica de este suelo se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: texturas arenosa, régimen de humedad ústico y de temperatura isohipertérmico, texturas gruesas y ausencia de endopedón.

Se localizan en los cordones litorales de los planos de marea de la planicie marina y fluvio-marina; los suelos se han originado de sedimentos aluviales gruesos, profundos, bien drenados, de texturas gruesas y fertilidad moderada. Morfológicamente, estos suelos son del tipo A-C. El horizonte A tiene un espesor de 22 cm, color pardo oscuro con moteados pardo amarillentos, textura franco arcillosa, estructura en bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados. El horizonte C se extiende hasta los 150 cm de espesor, conformado por tres subhorizontes C1, C2 y C3; tiene colores pardo amarillento claro, pardo y pardo pálido con moteados de color pardo, sin estructura (suelta). Químicamente tienen una capacidad catiónica y bases totales medias a bajas; el contenido de carbón orgánico es bajo; el fósforo total es alto en todo el perfil; la reacción del suelo cambia de ligera a moderadamente alcalina.

Al igual que en los otros tipos de suelos los contenidos de C y N son difícilmente comparables por la heterogeneidad que puede producir el proceso de sedimentación. Si no se tiene en cuenta este aspecto, se observa un descenso del contenido de C del 21% y del 20% de N. La reacción, muy alcalina en ambos casos, no permite explicar la fuerte disminución del contenido asimilable de P en el cultivo por acción del Ca, por lo que probablemente deba relacionarse con la actuación extractiva de las plantas.

Las principales limitaciones para el uso y manejo de estos suelos son la baja retención de humedad, la permeabilidad muy rápida, la escasa capacidad para retener cationes y las condiciones climáticas. De modo similar a los otros suelos también hay un escaso contenido de C.

Tabla 31. Especies vegetales características en el bosque de la zona 6.

Familia	Nombre Científica
APOCYNACEAE	<i>Calotropis procera</i> (Aiton) Dryand.
ASTERACEAE	<i>Viguiera mucronata</i> S.F.Blake
BIGNONIACEAE	<i>Dolichandra unguis-cati</i> (L.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Fridericia dichotoma</i> (Jacq.) L.G.Lohmann
BIGNONIACEAE	<i>Fridericia pubescens</i> (L.) L.G.Lohmann

Familia	Nombre Científica
BORAGINACEAE	<i>Cordia alba</i> (Jacq.) Roem. & Schult.
CAPPARACEAE	<i>Crateva tapia</i> L.
CAPPARACEAE	<i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J.Presl
CONVOLVULACEAE	<i>Ipomoea triloba</i> L.
CONVOLVULACEAE	<i>Merremia aegyptia</i> (L.) Urb.
LECYTHIDACEAE	<i>Lecythis minor</i> Jacq.
LEGUMINOSAE	<i>Acacia polyphylla</i> DC.
LEGUMINOSAE	<i>Acacia tortuosa</i> (L.) Willd.
LEGUMINOSAE	<i>Albizia niopoides</i> (Benth.) Burkart
LEGUMINOSAE	<i>Machaerium milleflorum</i> Pittier
LEGUMINOSAE	<i>Pithecellobium lanceolatum</i> (Willd.) Benth.
LEGUMINOSAE	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.
LEGUMINOSAE	<i>Rhynchosia minima</i> (L.) DC.
MALVACEAE	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.
MALVACEAE	<i>Melochia caracasana</i> Jacq.
MALVACEAE	<i>Melochia parvifolia</i> Kunth
NYCTAGINACEAE	<i>Boerhavia erecta</i> L.



Figura 27. Sitio de muestreo Zona 6. (a) Cutivo (hortalizas), (b) Bosque y (c) Perfil del suelo Fuente: (c) (IGAC, 2009)

Tabla 32. Propiedades físico-químicas de los suelos de la zona 6.

PROPIEDADES	CULTIVO	BOSQUE
COLOR en húmedo	10YR 3/3	10YR 3/3
Da (g cm⁻³)	1,45	1,36
% Arena	67,8	59,8
% Arcilla	11,0	18,8
% Limo	21,2	21,4
pH (H₂O)	8,6	8,7
N total (%)	0,12	0,15
C total (%)	1,28	1,62
C ox (%)	1,26	1,52
C/N	10,9	10,2
P olsen (ppm)	19,91	38,56
P total (ppm)	1221,3	1221,3
S (ppm)	358,53	373,35
Ca⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	6,1	7,5
Ca total (cmol(+)kg⁻¹)	58,8	70,2
Mg⁺² (cmol(+)kg⁻¹)	3,2	3,3
Mg total (cmol(+)kg⁻¹)	51,4	65,0
K⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,6	0,9
K total (cmol(+)kg⁻¹)	14,1	17,7
Na⁺ (cmol(+)kg⁻¹)	0,4	0,7
Na total (cmol(+)kg⁻¹)	1,9	2,3
CICE (cmol(+)kg⁻¹)	10,3	12,4
CIC (cmol(+)kg⁻¹)	10,4	12,6

4. Bibliografía

- Batjes, N.H. (2005). Soil carbon stocks of Jordan and projected changes upon improved management of croplands. *Geoderma* 132, 361-371.
- Brady, N. y Weil, R. 2002. The nature and propiedades of soils. 13 ed. New Jersey: Prentice-Hall. p. 720-725.
- Burbano Orjuela, Hernán (2010). El suelo al servicio de la sociedad y su rol en el contexto de los Cambios Globales. En: *Revista Tendencias*. Vol. XI. No. 2 Pasto: Universidad de Nariño, pp 53-62.
- Carvajal, et al. (2009). Soil Organic Carbon in Different Land Uses of Colombian Andean Landscapes, . *J. Soil. Sci. Plant Nutr*, 9(3), 222-235.
- Contraloría General de la República. (2011). Informe Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2009 - 2010. Bogotá: CGR.
- Cortés Lombana, A. (2004). Suelos Colombianos. Una mirada desde la academia. Colección de estudios ambientales. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Gómez. S. C. (2002). Modelo para la evaluación, monitoreo y seguimiento del impacto ambiental de las actividades agrícolas intensivas sobre los suelos colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales – Facultades de Derecho y Ciencias Económicas. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Tesis de grado. Bogotá. 183 p.
- Malagon, D. (s.f.). Ensayo Sobre Tipología De Suelos Colombianos; Énfasis En Génesis Y Aspectos Ambientales. 2003, 319-342.
- IDEAM. (2006). *Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero*. 29p. Colombia.
- IDEAM. (2012). Propuesta para la Gestión Integral Ambiental del Recurso Suelo (GIARS). Informe Final. Diagnóstico Nacional del Estado del Recurso Suelo. Convenio 153 Interadministrativo de Asociación entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (antes MAVDT) (No. 160/11) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (No.015A/11).
- IGAC. (1995). Estudio general de suelos de la zona quebrada de la sierra nevada de Santa Marta. Colombia. 385.
- IGAC- CORPOICA. (2002). Zonificación de los Conflictos de Uso de las Tierras en Colombia. 87 p.
- IGAC. (2009). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena. 496p.

Capítulo 2. Justificación, Objetivos y Metodología

- IGAC. (2012). Estudio de los conflictos de uso del territorio colombiano escala 1:100.000. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Imprenta Nacional de Colombia.
- IUSS, ISRIC, FAO.(2006). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Segunda edición. 117p
- Jaramillo, D. F.; Parra, L. N. y Gonzalez , L. H. (1994). El recurso suelo en Colombia: Distribución y Evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- Jaramillo, D. F. (2004). El recurso suelo y la competitividad del sector agrario colombiano. Universidad Nacional De Colombia. Medellín. 26p.
- Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J. (2005). Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics and altitude. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 255-266
- León, S. T., Cock, A. V., Durán, N. D., Herreño, A. M., y Quiroga, C. P. (2001). Estado del recurso suelo en Colombia. En: Estado de los recursos naturales y del ambiente 2000 – 2001. Contraloría General de la República. Bogotá. 292 p.
- León S., T. y Espinosa A, J.A. (2004). Proyecto de Apoyo a la Transición de la Agricultura Documento Preparado como Soporte al Capítulo De Salvaguardias Ambientales Consideraciones Ambientales del Sector Agropecuario y el Medio Rural Colombianos Consultoría elaborada para el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Banco Mundial., Bogotá Diciembre de 2004.
- Malagón, D. Correa Adela. (2006). Los suelos y el cambio climático, caso Colombia. *Análisis geográfico* Número 33pp 1-92. p21-43.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2010). Natural Resources Conservation Service. 2010. Keys to Soil Taxonomy by Soil Survey Staff. Eleventh Edition, 338p
- Vásquez , J. R., Macías, F., & Menjivar, J. C. (2011). Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60(4), 369-379.



Capítulo 3.

Variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados



VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Resumen

Para evaluar el efecto del cambio del uso en las propiedades físicas y químicas de los suelos al norte del departamento del Magdalena (Colombia), se seleccionaron seis zonas para el muestreo, entre 0 y 1000 msnm con el criterio de representar suelos de cultivos agrícolas de mayor importancia en la región y suelos de bosques aledaños a las áreas cultivadas; en cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo: cultivo y bosque, en cada sitio se tomaron cuatro muestras compuestas para un total de 52 muestras de suelos. Las propiedades evaluadas fueron: Físicas (Color, Textura y Densidad aparente) y Químicas (pH, CIC, N total, C total, C oxidable, MO, bases totales y de cambio, Disolución selectiva de Fe y Al, Fe total, Al total, P total, P asimilable y S total).

El análisis de los datos se realizó utilizando diversos enfoques: univariado (estadística descriptiva) y multivariado; el cual aportó información acerca de la variación de las propiedades. Las propiedades con mayor heterogeneidad entre los suelos fueron P, K total y Na total, el resto presentó una variabilidad moderada; los resultados del ANOVA multivariado muestran diferencias estadísticas entre las zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción para la mayoría de las propiedades estudiadas, excepto la relación C/N, S total, Na^+ , K^+ y Ca^{+2} , los valores medios de las diferentes propiedades para los suelos de bosques superan los valores medios para suelos de cultivos. El análisis factorial por componentes principales permitió reducir el conjunto original de variables, reteniendo seis nuevas variables sintéticas que explicaron en conjunto el 83,3% de la variabilidad total presente en la matriz original de observaciones. Mediante el análisis de clasificación discriminante se pudo determinar que las propiedades más susceptibles al cambio en el uso del suelo fueron, Fe total, Mg total, pH, C total, Da y consideradas como predictoras significativas por sí solas N total, C total, MO y Da.

Los resultados de la extracción selectiva de Fe y Al, muestran que en su mayoría el Fe se encuentra formando oxihidróxidos cristalinos y en una proporción muy baja ligado a compuestos orgánicos, lo que refleja una pobre evolución del humus en las zonas estudiadas. La extracción de Al con Ditionito resultó muy poco eficaz, probablemente poca presencia del Al ligado a los óxidos de Fe cristalinos; el Al extraído con Oxalato amónico representó solo el

3% del Al total, lo que sugiere un alto porcentaje de Al formando parte de estructuras cristalinas.

1. Introducción

En el departamento del Magdalena se presentan cinco tipos de paisajes: el montañoso, correspondiente a la Sierra Nevada de Santa Marta, situado a orillas del mar caribe, sus cumbres se elevan considerablemente, dando como resultado la presencia de todos los pisos térmicos, diversidad de especies de flora y fauna y abundancia de agua; lomerío, con lomas y colinas de poca altura; el piedemonte, ubicado en la base de la Sierra Nevada en el sector occidental; la planicie, compuesta por terrazas y planos inundables, hace parte principalmente de la zona de influencia del río Magdalena y el valle, ubicado al sureste del departamento en la zona de influencia del río Ariguaní. (IGAC, 2009)

El clima puede considerarse como el factor formador más determinante de los suelos, ya que su acción no solo se traduce como causal diferenciador de ellos, sino que, en gran medida, define las plantas y los organismos presentes, sus cantidades, distribuciones y relaciones. Influye también, a través del agua efectiva, que, al pasar por los materiales edáficos, causa disolución, translocación, eliminación, reorganización mineralógica y redistribución de materiales tales como coloides y nutrientes. En la megacuena de sedimentación el clima es cálido seco y pertenece en su gran mayoría a la formación bosque seco tropical; la vegetación imperante tiene poca influencia como factor formador de suelos debido a los escasos aportes de materia orgánica, por ser plantas de escaso y fino follaje; así mismo, las altas temperaturas aceleran los procesos de descomposición de los materiales orgánicos, por lo que su permanencia en el suelo es poco duradera. La precipitación y la temperatura son elementos del clima fundamentales en las reacciones químicas, en el incremento de la actividad microbiana y macrobial del suelo, en la transformación de materiales orgánicos y son los agentes responsables en gran parte, de la erosión y transporte de materiales, como también en la translocación de materiales edáficos dentro de los suelos (Malagón, 2003). La temperatura ambiental del área es alta, superior a 28 °C, lo cual influye en la actividad de la microfauna y la microflora como en la acumulación de materia orgánica del suelo. Actúa directamente en la velocidad con que se suceden las reacciones químicas del suelo y en la alteración física de los sedimentos depositados en toda la planicie.

La mayor parte de las tierras del departamento del Magdalena se encuentran localizadas en los paisajes de lomerío y planicie, con suelos aptos para el establecimiento de sistemas agrícolas transitorios semiintensivos, permanentes intensivos y semiintensivos, agrosilvícolas y agrosilvopastoriles; se presentan además zonas de menor extensión ubicadas en el paisaje de montaña, piedemonte y valle, con vocación agropecuaria, forestal, conservación y de manejo especial. Los suelos en el departamento del Magdalena se han derivado de una gran variedad de materiales, tanto in situ como transportados. En el sector del macizo montañoso de la Sierra Nevada que se encuentra en el departamento del Magdalena, los materiales son de variada naturaleza y complejidad. Más de la mitad del macizo consta de rocas ígneas intrusivas, el resto está constituido por rocas volcánicas y metamórficas. El incipiente desarrollo de los suelos localizados en las partes altas se debe primordialmente a los procesos erosivos y continuos a que están sometidos; el proceso erosivo se opone, a través del tiempo, a la acción de los factores y procesos de formación, por lo que los suelos estarán en busca del equilibrio con su medio ambiente. En los planos de inundación de la planicie y valles aluviales, el proceso pedogenético se ve interrumpido continuamente por el aporte periódico de sedimentos a través de las inundaciones, iniciándose muchas veces un nuevo ciclo de formación (IGAC, 2009).

A pesar del bajo contenido de materia orgánica (65% de los suelos), el humus evoluciona en condiciones de alternancia estacional de precipitación y temperaturas altas (los regímenes ústico y arídico abarcan el 65%), pH superiores a 5,6 (73% de los suelos), adecuadas bases de intercambio, condiciones bajas de saturación de Al (87% de los suelos con saturaciones inferiores al 30%) y predominancia de arcillas 2:1 (esmeclitas, vermiculita y micas) en el 70 - 75% de los suelos, en especial en la parte central de la región y en la Guajira (Malagón, 2003).

Para el estudio de la mineralogía de los suelos en la región Caribe Colombiana, Malagón y Santana (1997), definieron ocho (8) asociaciones que configuran la distribución y abundancia de especies minerales en la fracción arena de los suelos del Caribe colombiano. En forma sintética, estas asociaciones permiten diferenciar dos grandes clases de suelos: a) Los cuarcíticos y b) Los feldespáticos; cada una de estas clases admite matices según los minerales accesorios que acompañan al mineral predominante; el caso de excepción lo constituyen dos porciones del área, una 1a zona periférica externa de la Sierra Nevada de Santa Marta y la otra el extremo suroccidental de la región, en inmediaciones del Golfo de

Urabá; en esas dos áreas los suelos contienen predominantemente minerales alterados. La ocurrencia de otros minerales (micas, anfíboles, piroxenos, epidota, clorita, opacos) es en todos los casos minoritaria; igualmente cantidades escasas de vidrio volcánico se reportan en la isla de Providencia. Por contraste con el resto de la región, la mineralogía de suelos de la isla de San Andrés presenta abundantes carbonatos además del cuarzo, que es predominante (Malagón y Marino, 1997). La fracción arcillosa de los suelos se agrupó en cuatro (4) clases: a) Esmectíticos, b) Caoliniticos, c) Micáceos y d) Vermiculíticos. Estas clases configuran también ocho <<asociaciones>>, en las cuales los constituyentes principales están acompañados por cuarzo, gibsita y micas o ilita. En la región se aprecia la amplia distribución del mineral esmectita, dominante en toda el área con excepción de la Sierra Nevada y su área de influencia al sur y oriente y la zona de la Serranía del Perijá; de otra parte, la caolinita parece concentrarse más en áreas periféricas de la Sierra Nevada de Santa Marta, en una franja angosta al extremo inferior oriental de la región y en una porción del sector sur de la misma, donde aparecen también escasas franjas de suelos vermiculíticos. Los minerales micáceos se concentran en la Guajira, donde se intercalan con la ocurrencia de esmectita en las vecindades de la Serranía de La Macuira (Malagón y Marino, 1997).

La mineralogía de la región admite algunas interpretaciones generales respecto de la proveniencia de los materiales originarios de los suelos, el grado de evolución o etapa intempérica y su fertilidad natural. En el primer caso, la mineralogía parece heredada de una mezcla de sedimentos marinos y continentales, estos últimos probablemente en estados previos de meteorización, a juzgar por el amplio predominio de cuarzo y caolinita. Por cuanto se refiere al estado evolutivo de los suelos, la ocurrencia de esmectita llevaría a asignarles una moderada madurez, si se acepta que dicha especie es el resultado de procesos de alteración actuantes sobre micas e ilita; concordantemente, la vermiculita constituiría también indicador de procesos pedogenéticos poco avanzados en los sectores indicados (Malagón y Marino, 1997).

El Al y Fe juega un papel importante en la estabilización de MOS, en el caso del Al causando toxicidad a los microorganismos, y posiblemente a través de la formación de complejos orgánicos insolubles y / o complejos de Fe que reducen la disponibilidad de la materia orgánica para los microorganismos (Tonnejck *et al.*, 2010). Diferentes métodos de disolución selectiva (MOS), tales como extracciones con oxalato de amonio ácido, pirofosfato de Na, ditionito-citrato (DC), se utilizan comúnmente en la cuantificación de las fracciones de

Al y Fe para fines de clasificación en los modernos sistemas de clasificación de suelos y caracterizar algunos componentes específicos de suelo (García-Rodeja *et al.*, 2007). La utilidad de estos métodos es limitada por el corto rango de ordenación y grado de cristalinidad de los componentes y por la baja tendencia del Al para formar oxihidróxidos. Aunque los MOS utilizados no siempre son específicos para un grupo dado de compuestos de Al, Si o Fe, algunos de ellos son razonablemente específicos para la mayoría de los suelos (Parfitt y Childs 1988, García-Rodeja *et al.*, 2007).

2. Materiales y Métodos

2.1. Muestreo

El muestreo y la descripción del área de estudio se detallan en el capítulo 2.

2.2. Métodos Analíticos

2.2.3. *Análisis físicos*

Se determinó el color de los suelos, mediante la tabla Munsell. La densidad aparente se determinó por dos métodos, el del cilindro graduado y el del terrón parafinado (IGAC, 2006), la textura de los suelos por el método del hidrómetro de Bouyoucos.

2.2.4. *Análisis mineralógico*

De las 52 muestras de suelos totales descritas en el capítulo 2, se redujeron a 13 para el análisis mineralógico, mezclando las cuatro muestras o réplicas de cada uso en las 6 zonas y obteniendo así 2 muestras por zona (una de cultivo y una de bosque), excepto en la zona 4 donde quedaron 3 muestras (dos de cultivo y una de bosque) (Tabla 1).

La separación de las fracciones (arena fina y arcilla) empleada para la identificación mineral se realizó teniendo en cuenta la metodología de separados del suelo por el método de la pipeta de Robinson, debido a la escasa proporción de MO no se aplicó ningún dispersante, lo que previene la formación de artefactos del tipo oxalato y de un incremento del ataque a los materiales primarios de mayor labilidad. Una vez obtenidas las fracciones se procedió a difracción de RX con radiación $\text{CuK}\alpha$ en un equipo Philips PM8203 difractometer (Philips, Wavre, Belgium).

Tabla 33. Muestras utilizadas en los análisis de mineralogía y disolución de equilibrio.

ZONAS	MUESTRAS	USO DEL SUELO	CLIMA	CLASIFICACIÓN	PAISAJE Y MATERIAL PARENTAL
1	1	Cultivo de Café con sombrío.	Cálido Húmedo; Altitud 956 msnm; Precip. 2000 mm; Tem 24°C	Typic Eutrodepts Údico Isohipertérmico Cambisol háplico	Paisaje de Montaña; Ladera; MP: esquistos
	2	Bosque húmedo tropical			
2	3	Cultivado hace más de 20 años con Palma Africana, actualmente se le dá un manejo orgánico al cultivo y se alterna con leguminosas como cobertura para el suelo.	Cálido seco; Altitud 42msnm; Precip. 1200 mm; Tem 28,4°C	Typic Ustifluvents Ústico Isohipertérmico Fluvisol háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales
	4	Bosque seco tropical secundario			
3	5	Suelo arado al momento del muestreo para la siembra de banano, anteriormente sembrado con arroz.	Cálido seco; Altitud 5 msnm; Precip. 1245 mm; Tem 27°C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: depósitos clásticos
	6	Bosque seco tropical			
4	7	Cultivo de Banano tradicional, anteriormente bosque seco tropical	Cálido seco; Altitud 15 msnm; Precip. 750 mm; Tem 27,5 °C	Typic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales medios
	8	Cultivado de Mango hace más de 15 años.			
	9	Bosque seco tropical secundario			
5	10	Cultivado con frutales de clima cálido.	Cálido muy seco; Altitud 10 msnm; Precip. 880 mm; Tem 30 °C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinos
	11	Bosque muy seco tropical			
6	12	Cultivado de hortalizas de clima cálido, anteriormente sembrados de Maiz.	Cálido muy seco; Altitud 7 msnm; Precip. 663 mm; Tem 29°C	Typic Ustipsamments Ústico Isohipertérmico Arenosol háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinos
	13	Bosque muy seco tropical			

2.2.5. Análisis químicos

Se determinó el **pH** en H₂O, en una relación 1:2.5 (IGAC, 2006). Los **cationes de cambio** Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺ fueron extraídos con cloruro amónico no tamponizado al pH del suelo y determinados, al igual que las bases totales solubilizadas por digestión ácida, por espectrofotometría de absorción atómica; la **CIC** se determinó saturando con cloruro amónico y valorando el exceso de amonio con ácido sulfúrico 0,05N; la **CIC efectiva** se determinó por suma de cationes extraídos con NH₄Cl; el **P asimilable y total** por el método Olsen y digestión ácida respectivamente; el **N, C y S total** se determinaron mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI); el **C oxidable (Cox)** mediante la técnica propuesta por Walkley y Black (1934), citado por IGAC (2006) y el **%MO** por cálculo multiplicando el Cox por el factor 1,724.

2.2.6. *Extracciones selectivas de Al, Fe*

a) *Extracción con pirofosfato sódico ($Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$) 0.1 M* (Bascomb, 1968). La finalidad de esta extracción es la solubilización de los complejos orgánicos de Al y Fe (Al_p y Fe_p , respectivamente), aunque su acción puede extenderse a formas inorgánicas de Al y Fe. Para minimizar errores en las determinaciones por la posible presencia de partículas en suspensión, caso de formas inorgánicas de Fe como la ferrihidrita, se procedió al filtrado de los extractos a través de filtros Albert con un tamaño de poros de $0,45 \mu$. b) *Extracción con oxalato amónico 0,2 M tamponado a pH 3* (Blakemore, 1983). El extractante es una mezcla de oxalato amónico 0,2 M ($(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$) y oxalato ácido ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$) en proporción 1:0,75 cuyo poder complejante permite la extracción de formas de Al y Fe (Al_o y Fe_o , respectivamente) ligadas a óxidos amorfos, óxidos hidratados, aluminosilicatos no cristalinos y a la materia orgánica. c) *Extracción con ditionito-citrato sódico 0,5 M en medio reductor* (Holmgren, 1967). Se considera que es capaz de solubilizar óxidos cristalinos de Fe, así como de Fe presente en inorgánicos no cristalinos y asociado a la materia orgánica. Es un buen estimador de la cantidad de Fe libre total (Fe_d). En todos los casos, las concentraciones de Al y Fe fueron determinadas mediante espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer 2380, Norwalk, CT).

2.2.7. *Disolución de equilibrio y modelización termodinámica*

En una disolución obtenida con una relación suelo-agua 1:20 agitando, dejando en reposo durante 6 días para luego centrifugar, filtrar y posteriormente se midieron los cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, manganeso, zinc) y aniones (cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos,...). A partir de los datos de concentración se realizaron modelizaciones termodinámicas, determinando la actividad de las diferentes especies iónicas y los índices de saturación mineral mediante el programa Phreeck.

2.3. **Análisis de la información:**

Para cada una de las propiedades físicas y químicas evaluadas se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación en relación al uso del suelo. Se realizó un ANOVA factorial multivariante, con el objeto de establecer diferencias estadísticamente significativas, entre zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción.

Se realizó un análisis de componentes principales para reducir la dimensión de los datos, agrupando variables y facilitando la explicación de la variabilidad total en un pequeño conjunto de factores que controlan la naturaleza de las muestras. Posteriormente se realizó un análisis discriminante, tomando como variable de agrupación usos del suelo y de esta manera establecer las variables que explican la diferencia entre grupos. (Programa SPSS versión 15). Para el análisis de las formas de Hierro y Aluminio se emplearon las interpretaciones comúnmente utilizadas para las extracciones selectivas:

Fe_t: Fe total presente en el suelo

Fe_d: Fe libre total. **Fe_t-Fe_d**: Fe en la estructura de silicatos. **Fe_a-Fe_o**: *oxihidróxidos* cristalinos de Fe (hematita, goethita, magnetita...).

Fe_o: Fe amorfo, en ferrihidrita, Fe en Complejos orgánicos, Fe en alófana.

Fe_p: Fe en complejos Fe-humus y en oxihidróxidos "activos" de Fe.

Al_o: Al en formas de bajo grado de orden (alofano, imogolita, etc);

Al_p: Al ligado a materia orgánica, en su mayor parte en complejos organoalumínicos constituyentes de la materia orgánica humificada.

Al final se establecieron las relaciones molares entre las diferentes formas de hierro y aluminio estudiadas.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis de la variabilidad con un enfoque univariado

Para cada una de las propiedades (físicas y químicas) evaluadas se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación en relación al uso del suelo.

En la Tabla 2 se consignan los valores medios de las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados, diferenciados por zonas y tipos de uso del suelo; en relación a la textura no se observa mucha variabilidad entre suelos de cultivo y suelos de bosques, siendo la fracción arena la de mayor porcentaje repercutiendo en las clases texturales en las que predomina la clase Franco Arcillo Arenosa. Los valores de densidad aparente determinados por el método del terrón parafinado (IGAC 2006) en promedio pueden considerarse de normales a ligeramente altos para suelos de textura media (Malagón, 1985); no obstante, los

mayores valores se presentan en suelos de cultivo, manifestándose el efecto del laboreo de los suelos en un ligero aumento de su densidad aparente.

Se presentan valores medios de pH de 6,9 para cultivos y valores de 7,1 para bosques, siendo la zona 1, la de mayor altitud y pluviometría, presenta además valores de pH bajos 5,6 y 6,5 respectivamente, lo que se corrobora con una alta saturación de bases en el complejo de cambio de los suelos estudiados, siendo el Calcio el catión dominante y, por tanto, el que condiciona las tendencias de los procesos fisicoquímicos existentes en estos suelos.

Los valores de Carbono total (Ct) y Carbono orgánico (Cox) en general son mayores en suelos de bosques que en suelos de cultivo encontrándose pérdidas de que oscilan entre 0 y 60% (en su mayor parte del 18 al 30%) para el C, si bien estos datos pueden estar muy fuertemente afectados por la naturaleza aluvial de la mayor parte de los suelos y su concentración en zonas de baja altitud. El Nitrógeno total Nt es ligeramente mayor en suelos de bosques y también se observan pérdidas de este elemento que pueden estar relacionadas con el cultivo, que son menores a las del C (0-48%). La relación C/N desciende ligeramente con el cultivo, pasando de valores en el entorno de 12 al de 10. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presenta una media de 18.1 (cmol(+) kg⁻¹ suelo) para suelos de bosque y de 12 (cmol(+) kg⁻¹ suelo) para suelos de cultivos, siendo los porcentajes y tipo de arcilla similares entre suelos de cultivo y bosques; por ello se considera que la materia orgánica del suelo es la responsable de marcar esta diferencia en la capacidad de almacenaje de nutrientes, circunstancia que resalta la importancia de avanzar en la caracterización cualitativa y cuantitativa de las formas en que se presenta este componente. En términos generales los valores de azufre, hierro y aluminio total aunque muy bajos son mayores en suelos de bosques que en suelos de cultivo evidenciando una cierta influencia del uso del suelo en las propiedades del mismo.

Se presentan valores medios de pH de 6,9 para cultivos y valores de 7,1 para bosques, siendo la zona 1, la de mayor altitud y pluviometría, presenta además valores de pH bajos 5,6 y 6,5 respectivamente, lo que se corrobora con una alta saturación de bases en el complejo de cambio de los suelos estudiados, siendo el Calcio el catión dominante y, por tanto, el que condiciona las tendencias de los procesos fisicoquímicos existentes en estos suelos.

Los valores de Carbono total (Ct) y Carbono orgánico (Cox) en general son mayores en suelos de bosques que en suelos de cultivo encontrándose pérdidas de que oscilan entre 0 y

60% (en su mayor parte del 18 al 30%) para el C, si bien estos datos pueden estar muy fuertemente afectados por la naturaleza aluvial de la mayor parte de los suelos y su concentración en zonas de baja altitud. El Nitrógeno total Nt es ligeramente mayor en suelos de bosques y también se observan pérdidas de este elemento que pueden estar relacionadas con el cultivo, que son menores a las del C (0-48%). La relación C/N desciende ligeramente con el cultivo, pasando de valores en el entorno de 12 al de 10. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presenta una media de 18,1 (cmol(+) kg⁻¹ suelo) para suelos de bosque y de 12 (cmol(+) kg⁻¹ suelo) para suelos de cultivos, siendo los porcentajes y tipo de arcilla similares entre suelos de cultivo y bosques; por ello se considera que la materia orgánica del suelo es la responsable de marcar esta diferencia en la capacidad de almacenaje de nutrientes, circunstancia que resalta la importancia de avanzar en la caracterización cualitativa y cuantitativa de las formas en que se presenta este componente. En términos generales los valores de azufre, hierro y aluminio total aunque muy bajos son mayores en suelos de bosques que en suelos de cultivo evidenciando una cierta influencia del uso del suelo en las propiedades del mismo.

Según Warrick y Nielsen 1980, propiedades que presenten CV <12% son de baja variabilidad, CV entre 12% - 60% variabilidad media y CV >60% variabilidad alta. Analizando los estadísticos descriptivos para cada una de las propiedades estudiadas, tomando como factor de agrupación el uso del suelo, como se muestra en Anexo 1, y de acuerdo con el grado de variabilidad de cada propiedad, definido en términos del coeficiente de variación CV% se pueden establecer cuatro categorías de variables:

- a. **Relativamente homogéneas (CV < 20%):** pH, C/N y Da.
- b. **Moderadamente heterogéneas (20% < CV < 40%):** N total cultivo, C total cultivo, Fe total bosque, Al total, S bosque, Mg total bosque, Arena, K total bosque, Ca⁺², Mg⁺² cultivo, CIC.
- c. **Normalmente heterogéneas (40% < CV% < 60%):** N total bosque, C total bosque, MO bosque, P Olsen y P total, S cultivo, K total cultivo, Na total, Ca total, Mg total cultivo, Limo y Arcilla, Mg⁺² bosque, K⁺ cultivo, Na⁺ bosque.
- d. **Extremadamente heterogéneas (CV > 60%):** K⁺ bosque, Na⁺ cultivo.

En términos generales se presenta una mayor variabilidad de las propiedades en los suelos de bosques, lo que se asimila a una mayor heterogeneidad de los suelos en este grupo, no obstante algunas propiedades íntimamente relacionadas al manejo agronómico de los cultivos marcan la diferencia como lo son el P total, K, Mg, Na y Da las cuales presentan una mayor variabilidad en suelos de cultivo.

Tabla 34. Propiedades físicas y químicas de los suelos.

PROPIEDADES	SUELOS CULTIVADOS							SUELOS DE BOSQUE						
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
COLOR Húmedo	10YR 3/4	2.5YR 3/3	2.5YR 3/3	10YR 3/2	2.5YR 3/2	10YR 3/3		10YR 3/2	10YR 3/3	10YR 3/6	2.5YR 3/2	10YR 3/2	10YR 3/3	
Da (g·cm⁻³)	1,49	1,4	1,25	1,57	1,43	1,45	1,4	1,4	1,33	1,19	1,46	1,35	1,36	1,3
% Arena	40,7	62,1	34,2	45,3	65,7	67,8	52,6	65,4	20,3	49,0	49,1	70,7	59,8	52,4
% Arcilla	21,0	22,8	45,7	34,2	18,5	11,0	25,5	23,2	41,1	21,0	20,9	15,5	18,8	23,4
% Limo	38,3	15,1	20,1	20,5	15,8	21,2	21,8	11,4	38,6	29,9	30,1	13,8	21,4	24,2
pH (H₂O)	5,6	6,3	6,5	7,1	7,1	8,6	6,9	6,5	5,6	7,0	7,8	7,1	8,7	7,1
N total (%)	0,23	0,12	0,13	0,17	0,13	0,12	0,1	0,31	0,17	0,13	0,15	0,25	0,15	0,2
C total (%)	2,61	1,34	1,28	1,84	1,28	1,28	1,6	3,90	1,64	1,72	1,76	3,26	1,62	2,3
C ox (%)	2,57	1,31	1,15	1,74	1,15	1,26	1,5	3,85	1,62	1,64	1,63	3,22	1,52	2,2
C/N	11,4	11,1	9,8	11,0	10,2	10,9	10,7	12,4	9,7	11,7	12,0	12,5	10,2	11,4
P olsen (ppm)	7,98	28,93	32,03	18,83	29,71	19,91	22,9	10,53	13,40	32,03	19,07	35,68	38,56	24,9
P Total (ppm)	1030,6	123,8	376,2	3241,7	963,1	1221,3	1159,5	596,3	156,1	352,7	1482,5	745,9	1221,3	759,2
S (ppm)	539,43	341,06	679,44	479,92	422,45	358,53	470,1	593,95	688,95	487,83	479,92	697,96	373,35	553,7
Ca⁺² (cmol(+)Kg⁻¹)	11,2	3,9	9,3	11,0	6,9	6,1	8,1	13,9	15,8	9,3	9,4	13,1	7,5	11,5
Ca total (cmol(+)Kg⁻¹)	75,7	11,5	99,3	93,9	49,5	58,8	64,8	107,6	23,0	101,3	101,7	46,9	70,2	75,1
Mg⁺² (cmol(+)Kg⁻¹)	3,3	1,8	5,1	3,5	1,6	3,2	3,1	3,8	10,8	6,0	4,1	4,0	3,3	5,3
Mg total (cmol(+)Kg⁻¹)	120,5	9,2	95,4	108,1	54,3	51,4	73,1	99,1	55,9	82,2	95,4	61,7	65,0	76,5
K⁺ (cmol(+)Kg⁻¹)	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,6	0,3	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,9	0,4
K total (cmol(+)Kg⁻¹)	20,9	3,2	11,9	25,2	12,4	14,1	14,6	13,9	16,9	7,9	18,6	14,1	17,7	14,9
Na⁺ (cmol(+)Kg⁻¹)	0,1	0,0	0,3	0,3	0,1	0,4	0,2	0,0	0,6	0,6	0,4	0,3	0,7	0,5
Na total (cmol(+)Kg⁻¹)	0,6	0,4	2,3	3,2	2,7	1,9	1,8	0,7	4,0	2,7	2,9	2,0	2,3	2,4
CICE (cmol(+)Kg⁻¹)	14,8	6,1	15,0	15,0	8,9	10,3	11,7	18,0	27,8	16,1	14,1	17,7	12,4	17,7
CIC (cmol(+)Kg⁻¹)	15,0	6,4	15,6	15,4	9,4	10,4	12,0	18,4	28,4	16,2	14,6	18,4	12,6	18,1

3.2. Análisis multivariado

Se realizó un análisis de varianza multivariado con arreglo factorial de los datos, considerando dos factores tratamientos, zonas con seis niveles y usos del suelo dos niveles, con el objeto de establecer el efecto de cada uno y de su interacción sobre las propiedades de los suelos; los resultados simplificados se detallan en la (Tabla 3). Observando que entre zonas, a excepción de la relación C/N, K⁺, Na⁺, Ca⁺², S total, CIC y porcentaje de limo, las demás propiedades presentaron diferencias estadísticamente significativas, destacando el efecto de las condiciones edafoclimáticas en la variación de las propiedades de los suelos estudiados; en relación al factor usos del suelo las propiedades que presentaron diferencias significativas fueron: Da, pH, Ct, Nt, MO, Fe total, Al total, Na total, Ca total, Mg⁺² y CIC, lo que demuestra una gran susceptibilidad de éstas propiedades a los cambios en el uso del suelo. Las propiedades que presentaron interacción positiva (zonas*usos), fueron: pH, Nt, Ct, MO, Fe total, Al total, K total, Na total, Mg total, Mg⁺² y la textura del suelo, en tal sentido se muestran los grupos homogéneos producto de la prueba de tukey para cada propiedad (Anexo 1).

Tabla 35. Resultados ANOVA multivariado.

PROPIEDADES	Significancia Estadística (P<0.05)		
	ZONAS	USOS	ZONAS * USOS
pH	0,00	0,02	0,00
Nt	0,00	0,00	0,04
Ct	0,00	0,00	0,047
MO	0,00	0,00	0,04
C/N	0,38	0,12	0,26
P olsen	0,02	0,65	0,39
P total	0,05	0,39	0,81
S total	0,33	0,16	0,13
CIC	0,21	0,04	0,10
K total	0,00	0,80	0,00
K ⁺	0,13	0,23	0,33
Na total	0,00	0,02	0,00
Na ⁺	0,53	0,26	0,75
Ca total	0,00	0,047	0,55
Ca ⁺⁺	0,33	0,12	0,25
Mg total	0,00	0,29	0,00
Mg ⁺⁺	0,03	0,01	0,02
A	0,00	0,82	0,00
Ar	0,00	0,59	0,00
L	0,13	0,46	0,00
Da	0,00	0,00	0,94

3.2.1. Análisis factorial por componentes principales

El análisis factorial por componentes principales permitió reducir el conjunto original de variables reteniendo seis nuevas variables sintéticas (CP 1, CP 2, CP 3, CP 4, CP 5 y CP 6), con valores propios mayores que 1; que explican en conjunto el 83.3% de la variabilidad total presente en la matriz original de observaciones (Tabla 4).

En la (Tabla 5) se registran los coeficientes de correlación entre las propiedades y los componentes principales (CP), valores de correlación mayores a 0.7, indican que las propiedades están altamente correlacionadas con los componentes principales, de acuerdo al criterio utilizado por Giraldo y Mendoza 2003. Las propiedades con la mayor contribución a la conformación del primer componente principal (CP 1) fueron: Fe, Al, K, Ca y Mg total. Este Factor 1 sintetiza la variación de los suelos relacionada mayoritariamente con el contenido de cationes totales; las propiedades con la mayor contribución a la conformación del segundo componente principal (CP 2) fueron : Nt, Ct, MO, C/N, Arena y Na , el CP 3 está explicado en mayor proporción por las variables P total y pH, el factor 4 explicado por P Olsen y Da, el CP 5 explica la composición textural de Arcilla y Limo y el CP 6 asociado a los contenidos de S total.

Considerando cada componente 1,2 y 3 como nuevas variables, se observa que los componentes principales 1 y 2 controlan más del 60% de la variabilidad total o naturaleza de las muestras; los valores para los CP 1 y 2 de sus medias son mayores para suelos de bosque que para suelos de cultivo, demostrando la sensibilidad de las variables explicadas por cada uno de ellos al cambio de uso del suelo. (Figura 7 y 8)

Tabla 36. Valores propios para los componentes principales.

Factor	Valor propio	Proporción	Acumulado
1	5,13	28,52	28,52
2	3,67	20,40	48,92
3	2,28	12,65	61,57
4	1,56	8,66	70,23
5	1,27	7,04	77,27
6	1,09	6,03	83,30

Tabla 37. Matriz de correlación entre propiedades y componentes principales.

Propiedades	Componentes Principales					
	1	2	3	4	5	6
pH	-0,39	0,00	0,72	0,32	-0,15	-0,14
Nt	0,64	0,64	-0,10	-0,08	-0,06	0,04
Ct	0,64	0,74	-0,08	0,02	-0,04	0,06
MO	0,62	0,74	-0,09	0,02	-0,04	0,08
C/N	0,38	0,68	0,02	0,22	0,07	0,13
Fe total	0,89	-0,27	-0,01	-0,18	-0,11	-0,22
Al total	0,78	-0,45	-0,16	0,26	-0,08	-0,12
P Olsen	-0,10	0,33	0,09	0,76	0,20	0,06
P total	0,26	-0,18	0,55	0,03	0,46	0,31
S total	0,42	0,06	-0,29	0,05	0,29	0,44
K total	0,64	-0,27	0,55	-0,12	0,09	0,26
Na total	0,12	-0,63	0,23	0,43	0,01	0,30
Ca total	0,63	0,03	0,38	0,28	-0,05	-0,49
Mg total	0,84	-0,25	0,30	-0,06	0,01	-0,26
Arena	-0,46	0,64	0,48	-0,09	0,03	-0,09
Arcilla	0,26	-0,43	-0,45	-0,02	0,61	-0,22
Limo	0,34	-0,38	-0,14	0,14	-0,70	0,36
Da	0,18	-0,02	0,53	-0,64	0,03	0,17

En el caso del CP 3 explicado mayoritariamente por las variables pH y Ptotal se observa como en zonas 1, 2, 3 y 4 los suelos de cultivo presentan mayores valores, que los suelos de bosques; en estas zonas se presentan los cultivos intensivos caracterizados por una aplicación considerable de fertilizantes que puede estar influenciando un proceso de alcalinización en estos suelos, mientras que en los suelos de las zonas 5 y 6 de naturaleza alcalina se evidencia una alta precipitación de P como fosfato de calcio.

Figura 28. Comportamiento del CP 1 en las diferentes zonas.

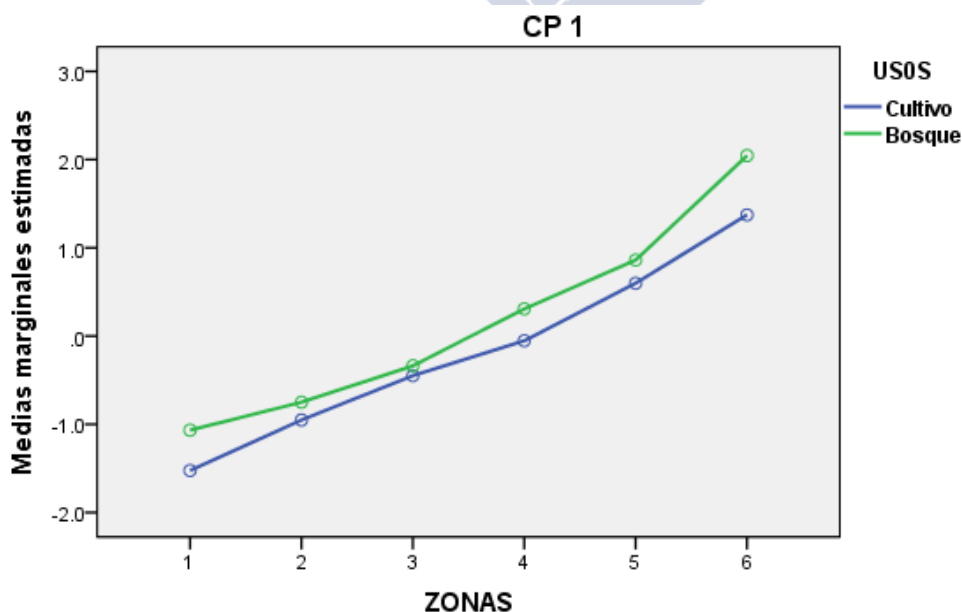


Figura 1. Comportamiento del CP 1 en las diferentes zonas.

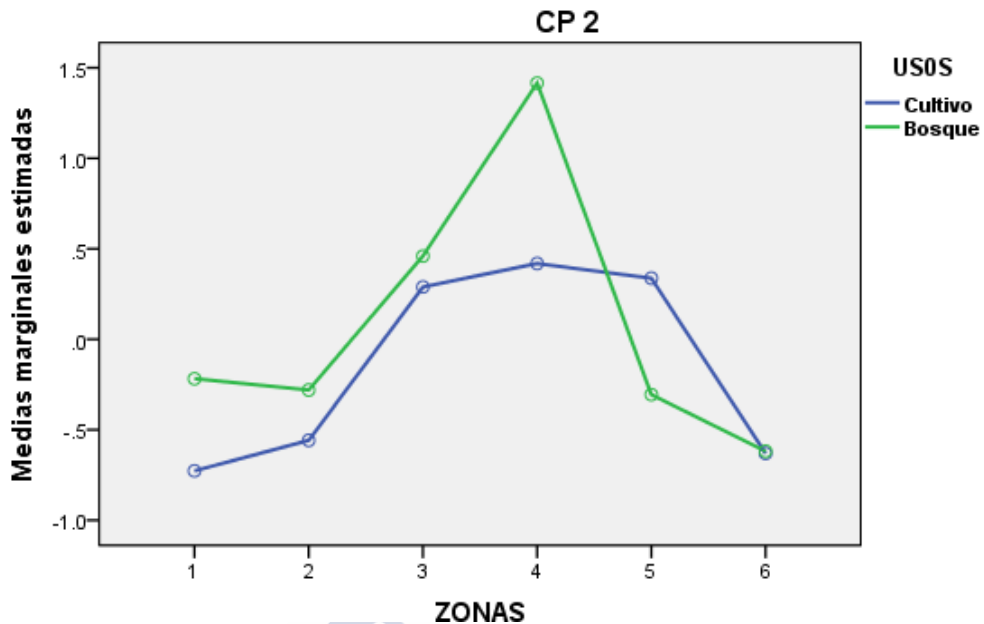


Figura 29. Comportamiento del CP 2 en las diferentes zonas.

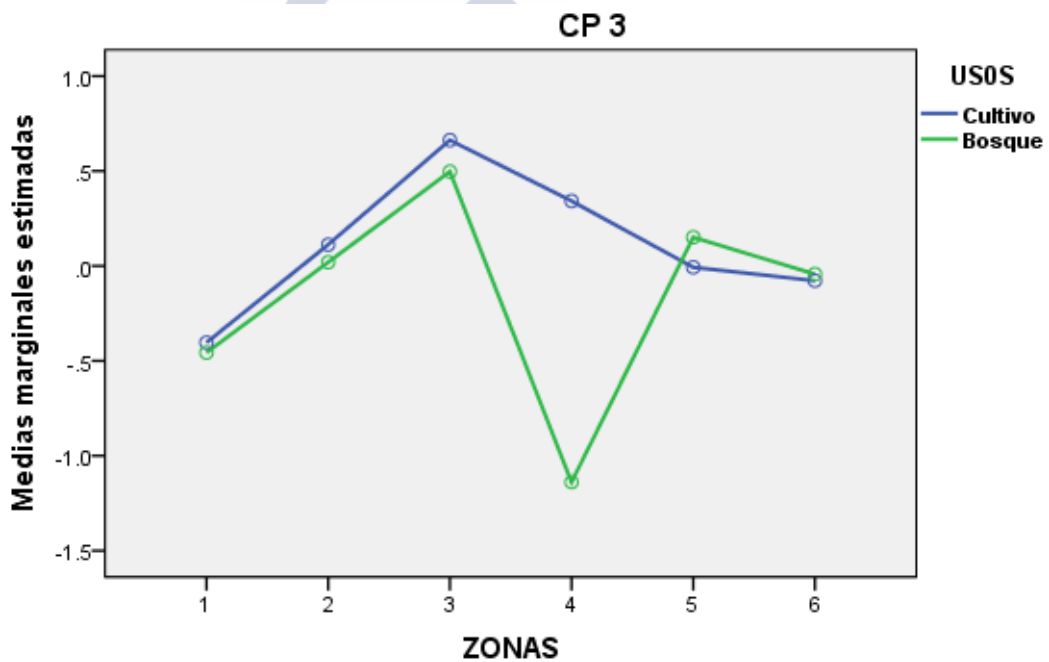


Figura 30. Comportamiento del CP 3 en las diferentes zonas.

3.2.2. Análisis discriminante

Con el objeto de identificar que propiedades se ven más afectadas por el cambio del uso del suelo, o en su defecto qué propiedades permiten diferenciar con mayor peso un determinado uso del suelo, se realizó un análisis de clasificación discriminante tomando como variable de agrupación los usos del suelo, obteniendo los siguientes resultados:

En la Tabla 6, se muestra como N total, C total, MO y Da son predictores significativos por si mismos, a diferencia del resto de propiedades, sin embargo, estos contrastes de medias no tienen en cuenta la correlación entre las variables para predecir futuras clasificaciones de propiedades en un determinado uso del suelo.

Se extrajo una función discriminante que explica el 100% de las diferencias existentes entre las propiedades de los suelos para cada uso, como se muestra en la (Tabla 7), el autovalor obtenido por encima de 1 y una correlación canónica moderadamente alta 0.74, nos permite indicar que las propiedades estudiadas permiten diferenciar los cambios en el uso del suelo.

Tabla 38. Prueba de igualdad de la media de los grupos.

Propiedades	Lambda de Wilks	F	Sig.
pH	0,986	0,706	0,405
Nt	0,915	4,661	0,036
Ct	0,892	6,069	0,017
MO	0,891	6,136	0,017
C/N	0,956	2,298	0,136
Fe total	0,997	0,162	0,689
Al total	0,952	2,522	0,119
P Olsen	0,994	0,309	0,581
P total	0,96	2,097	0,154
S total	0,965	1,808	0,185
K total	0,991	0,446	0,507
Na total	0,978	1,105	0,298
Ca total	0,992	0,4	0,53
Mg total	0,999	0,032	0,859
Arena	1	0,007	0,935
Arcilla	0,992	0,411	0,525
Limo	0,993	0,344	0,56
Da	0,823	10,777	0,002

Tabla 39. Autovalores.

Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Correlación canónica
1	1.218a	100	100	0,741

El estadístico Lambda de Wilks expresa la proporción de variabilidad total no debida a la diferencia entre usos del suelo, atendiendo los resultados el valor de Lambda es ligeramente bajo, lo cual significa que no hay mucho solapamiento de las propiedades estudiadas en

relación al uso del suelo corroborada por la diferencia estadísticamente significativa de 0,01, por lo cual rechazamos la hipótesis nula de que los usos del suelo tienen promedios iguales para las variables discriminantes, (Tabla 8).

Tabla 40. Lambda de Wilks

Contraste	Lambda de Wilks	Chi-cuadrado	gl	Sig.
1	0,451	33,061	17	0,011

Revisando los coeficientes estandarizados de la función discriminante (Tabla 41) concluimos que las variables más ponderadas para maximizar la discriminación de los usos del suelo fueron: Fe total, Mg total (signo negativo), pH, C total y Da (signo positivo).

Tabla 41. Coeficientes estandarizados.

Propiedad	Función
Da	-0,421
MO	0,317
Ct	0,316
Nt	0,277
Al total	0,204
C/N	0,194
P total	-0,186
S total	0,172
Na total	0,135
pH	0,108
K total	-0,086
Arcilla	-0,082
Ca total	0,081
Limo	0,075
P Olsen	0,052
Mg Total	-0,023
Arena	0,011

Para interpretar los signos de las ponderaciones resulta útil inspeccionar primero la ubicación de los centroides de cada uso (

). Podemos comprobar entonces que el grupo uso cultivo tiende a obtener puntuaciones negativas en la función discriminante mientras que el grupo uso bosque, tiende a obtener puntuaciones positivas; sabido esto la función discriminante nos indica por ejemplo, qué valores de C total por encima del promedio (1,95%) para las condiciones edafoclimáticas de las zonas estudiadas hará más probable que el uso obtenga una puntuación positiva y, con

ello, que se ajuste a las condiciones de los suelos de bosque; por el contrario valores de C total por debajo de la media será característico de suelos de cultivo. En cuanto a la variable Da un valor por encima de la media $1,45 \text{ g cm}^{-3}$, hará disminuir la función discriminante y será más característico de los suelos de cultivo, lo que se justifica por el mal manejo de muchos suelos dedicados a la agricultura intensiva. Basándonos en lo anterior podemos afirmar que los contenidos de Ct se pueden utilizar como un posible indicador para monitorear la degradación de los suelos dedicados a la agricultura en las zonas estudiadas, situación que reafirma el efecto en el cambio del uso del suelo sobre las pérdidas de Carbono y de otros elementos importantes en la fertilidad de los suelos.

Tabla 42. Centroides.

Usos	Función
Cultivo	-1,002
Bosque	1,169

La matriz de estructura (Tabla 10) contiene las correlaciones entre la matriz discriminante y la función discriminante estandarizada, ellas muestran que Da, MO, Ct y Nt son las variables que presentan mejor correlación con la función, permitiendo demostrar el impacto que tiene en la disminución de los contenidos de C, el cambio de uso en los suelos, de esta manera para las condiciones edafoclimáticas de las zonas estudiadas se pueden tomar como referencia estas variables a fin de mitigar los efectos negativos derivados de la actividad agrícola sobre el deterioro en la calidad de los suelos.

Tabla 43. Matriz de estructura.

Propiedad	Función
Da	-0,421
MO	0,317
Ct	0,316
Nt	0,277
Al total	0,204
C/N	0,194
P total	-0,186
S total	0,172
Na total	0,135
pH	0,108
K total	-0,086
Arcilla	-0,082
Ca total	0,081
Limo	0,075

Propiedad	Función
P Olsen	0,052
Mg Total	-0,023
Arena	0,011

3.3. Disolución selectiva de Hierro y Aluminio.

Los datos analíticos encontrados en las muestras de suelos estudiadas para las fracciones de Fe y Al obtenidas por extracciones selectivas dieron los resultados expresados en la Tabla 12.

Tabla 44. Extracción selectiva de Fe y Al en g kg⁻¹.

Formas de Fe y Al	CULTIVO						Media	CV	DS
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6			
Fe_t	54,8 a	7,45 e	38,55 bc	39,87 bc	20,99 d	19,2 d	30,15	51,4	16,22
Fe_d	16,01 a	1,54 f	10,78 c	8,87 d	2,99 f	1,38 f	6,93	76,0	5,48
Fe_o	3,19 ab	0,94 f	2,35 cde	2,92 abc	1,69 e	0,3 f	1,90	54,4	1,11
Fe_p	0,024 b	0,006 c	0,005 c	0,01 c	0,004 c	0,002 c	0,01	95,5	0,01
Al_t	32,73 abc	7,46 f	36,83 ab	32,17 abc	21,62 de	18,47 e	24,88	40,4	10,48
Al_d	1,29 a	0,14 g	0,67 c	0,52 d	0,27 ef	0,17 g	0,51	77,6	0,40
Al_o	1,35 b	0,18 f	0,68 de	0,69 de	0,45 ef	0,55 de	0,65	55,2	0,36
Al_p	0,012 b	0,005 b	0,005 b	0,005 b	0,004 b	0,003 b	0,01	52,7	0,00
BOSQUE									
Fe_t	45,5 b	36,15 c	33,8 c	37,3 c	23,67 d	21,48 d	32,98	27,3	9,00
Fe_d	13,52 b	18,03 a	9,07 cd	8,91 cd	6,12 e	1,69 f	9,56	59,5	5,69
Fe_o	3,32 a	2,5 bcd	2,1 de	2,7 abcd	2,49 cd	0,5 f	2,27	42,2	0,96
Fe_p	0,024 b	0,064 a	0,006 c	0,005 c	0,007 c	0,002 c	0,02	132,5	0,02
Al_t	30,2 bcd	40,41 a	34,1 ab	31,68 abc	23,19 cde	20,48 e	30,01	24,3	7,28
Al_d	1,35 a	0,87 b	0,54 d	0,51 d	0,37 e	0,18 fg	0,64	65,8	0,42
Al_o	1,79 a	1,03 c	0,56 de	0,64 de	0,75 d	0,73 de	0,92	49,9	0,46
Al_p	0,012 b	0,124 a	0,008 b	0,005 b	0,006 b	0,003 b	0,03	182,1	0,05

CV= Coeficiente de variación; DS= desviación estándar; Medias con distintas letras son diferentes entre si según prueba de Tukey (P≤ 0,05)

Revisando el análisis de correlación entre las diferentes formas de Fe y Al extraídas y las propiedades físico-químicas de los suelos se observa en general una correlación significativa (Anexo 9), destacando correlaciones negativas con el pH y la fracción Arena, acorde a lo descrito por Bronick *et al.*, 2005. El Nt correlaciona muy bien con todas las formas de Fe, el Ct no presenta correlación significativa con las formas de Fe y Al extraídas con pirofosfato, lo que da cuenta de la poca o casi nula presencia de formas orgánicas ligadas

a estos elementos en los suelos estudiados y también de la escasa especificidad del reactivo extractante (pirofosfato) en suelos con muy bajos contenidos de C humificado. A excepción de las fracciones extraídas con pirofosfato el Ca, Mg y K presentaron correlaciones positivas altamente significativas principalmente con las formas de Fe y Al totales.

Como producto del ANOVA multivariado con arreglo factorial, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre zonas y usos del suelo para todas las formas de Fe y Al extraídas; en contraste a lo reportado por Ramírez *et al.* (2009), quienes trabajando en un Andisol bajo diferentes usos y manejos del suelo (Marinilla, Colombia) y Leiva (1992) en estudios realizados en Ultisoles del subtrópico argentino no encontraron diferencias significativas entre usos del suelo para los contenidos de Fe_t . En términos generales los contenidos de las diferentes formas de Fe y Al (Tabla 13) fueron mayores para suelos de bosques en relación con los suelos de cultivo, destacando los mayores valores de Fe_t en la zona 1 con ($54,80 \text{ g kg}^{-1}$) y el menor valor en la zona 2 para los suelos (Entisol) de cultivo con palma africana ($7,46 \text{ g kg}^{-1}$) donde se evidencia un fuerte detrimento en los contenidos de Fe en relación a los suelos de los bosques aledaños.

Los valores de Fe libre extraído con ditionito (Fe_d), fueron significativamente mayores a los de Fe extraído con oxalato (Fe_o) y a los de pirofosfato (Fe_p), con una media de $9,56 \text{ g kg}^{-1}$, para suelos de bosque y de $6,93 \text{ g kg}^{-1}$ para suelos de cultivo, estas diferencias indican, que el Fe se encuentra principalmente formando parte de los oxihidróxidos cristalinos; así los bajos contenidos de Fe_o $2,27 \text{ g kg}^{-1}$, para suelos de bosque y de $2,05 \text{ g kg}^{-1}$ para suelos de cultivo indican pequeñas cantidades de hierro en compuestos de bajo grado; mucho más pequeña resultaron las cantidades de hierro relacionada con los complejos orgánicos representada por los valores de Fe_p $0,02 \text{ g kg}^{-1}$ para suelos de bosque y $0,01 \text{ g kg}^{-1}$ para suelos de cultivo, (Tabla 13); el contenido de Fe libre extraído con ditionito correspondió únicamente con el 22,8% y 29% del hierro total para suelos de cultivos y bosques respectivamente.

El Fe silicatado ($Fe_t - Fe_d$) se comportó de manera similar en los diferentes usos del suelo, no obstante en las zonas 1 (Café), 3 (suelo arado) y 5 (frutales) los valores superaron a los suelos de bosques; situación que puede estar relacionada con la heterogeneidad del material parental en cada zona, o en otros casos debido posiblemente a que al aumentar la intensidad de uso del suelo, aumenta paralelamente el contenido de Fe-silicatado, y por ser

este menos reactivo influye en menor escala en la agregación de las partículas del suelo, acorde a lo descrito por Ramírez *et al.* 2009.

El Fe presente en los óxidos de hierro cristalinos (goethita y hematita) se estimó mediante la diferencia en el contenido de Fe_d y Fe_o (Parfitt y Childs 1988) (Tabla 13); de acuerdo con Smith (1994), su presencia depende de una buena aireación, una temperatura y humedad adecuada, además de un alto potencial redox en el suelo. Para los suelos de cultivo el valor medio ($5,16 \text{ g kg}^{-1}$) representó el 16,36% del Fe total y para suelos de bosques ($7,29 \text{ g kg}^{-1}$) el 22,10%. Siendo las zonas 5 y 6 donde los óxidos de hierro cristalinos representan solo el 5,6% del Fe total. A su vez el 77,14% y 71% del Fe total forma parte de la estructura de los silicatos ($Fe_t - Fe_d$) para los suelos de cultivos y bosques respectivamente; incluso llegando hasta el 93% para los suelos de cultivo en la zona 6.

Tabla 45. Relaciones molares entre Fe y Al.

Relaciones Fe y Al	CULTIVO						
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
Fe_d-Fe_o	12,82	0,59	8,43	5,95	1,31	1,08	5,03
Fe_t-Fe_d	38,79	5,92	27,77	31,00	18,00	17,82	23,22
Fe_o/Fe_d	0,20	0,62	0,22	0,33	0,56	0,22	0,36
Fe_d/Fe_t	0,29	0,21	0,28	0,22	0,14	0,07	0,20
Fe_p/Fe_d	0,0015	0,0037	0,0005	0,0007	0,0013	0,0014	0,0015
Fe_p/Fe_o	0,0074	0,0061	0,0021	0,0022	0,0022	0,0062	0,0044
Al_o-Al_p	1,34	0,17	0,67	0,69	0,44	0,55	0,64
Al_p/Al_o	0,0087	0,0303	0,0074	0,0070	0,0086	0,0056	0,0113
Al_p/Al_d	0,0091	0,0388	0,0074	0,0092	0,0140	0,0179	0,0161
	BOSQUE						
Fe_d-Fe_o	10,20	15,53	6,97	6,21	3,63	1,20	7,29
Fe_t-Fe_d	31,98	18,12	24,73	28,39	17,55	19,79	23,43
Fe_o/Fe_d	0,25	0,14	0,23	0,30	0,41	0,29	0,27
Fe_d/Fe_t	0,30	0,50	0,27	0,24	0,26	0,08	0,27
Fe_p/Fe_d	0,0017	0,0036	0,0007	0,0005	0,0012	0,0013	0,0015
Fe_p/Fe_o	0,0071	0,0256	0,0029	0,0018	0,0029	0,0045	0,0075
Al_o-Al_p	1,78	0,91	0,56	0,63	0,74	0,72	0,89
Al_p/Al_o	0,0067	0,1201	0,0136	0,0071	0,0082	0,0038	0,0266
Al_p/Al_d	0,0089	0,1420	0,0142	0,0090	0,0166	0,0153	0,0343

La relación Fe_o/Fe_d osciló entre 0,2-0,62 $g\ Kg^{-1}$ para suelos de cultivo y entre 0,14 y 0,41 $g\ Kg^{-1}$ para suelos de bosques, observándose en general valores relativamente medios a bajos en la concentración de Fe amorfo, datos que son consistentes con los resultados de Acevedo et al. (2002). Los valores menores de 0,0037 en la relación Fe_p/Fe_d y valores muy bajos entre 0,002 y 0,026 en la relación Fe_p/Fe_o indican una muy limitada asociación de Fe con los compuestos orgánicos; la poca afinidad de este elemento por la MO además, del poco Fe lábil se debe probablemente a la presencia de humus joven con baja capacidad para la formación de complejos (Shoji y Fujiwara, 1984), unido a que los valores de pH próximos a la neutralidad o alcalinos, tanto las formas de Fe como las de Al son escasamente reactivas con los componentes húmicos.

En relación a la extracción selectiva del Al, se presentaron valores mayores de Al_o en relación a los extraídos con ditionito, debido posiblemente a que el ditionito-citrato es poco eficaz para la extracción de Al cuando éste es escasamente reactivo y por el contrario funciona cuando hay mucho aluminio ligado a los óxidos de Fe cristalinos (García-Rodeja, *et al.*, 2007).

El Aluminio amorfo representó solo el 2,5% y 3% del Al total para suelos de cultivos y bosques respectivamente, lo que sugiere un alto porcentaje del Al formando parte de estructuras cristalinas acorde a lo descrito por Zysset et al. (1999). Los valores de oxalato ácido dan una aproximación del grado de acumulación de los productos amorfos de reciente alteración, además la fracción amorfa de los suelos se relaciona con problemas de labranza como son dispersión, floculación, agregación infiltración, erosión y estabilidad de los terrenos (Jones, 2000, Schaefer et al., 1999); el Al extraído por oxalato ácido tiende a ser considerado como un representante de oxihidróxidos e hidróxidos de Al, los cuales pueden estar o no asociados con sustancias húmicas y aluminosilicatos amorfos (Paterson *et al.*, 1993).

La extracción selectiva de Al con pirofosfato (complejos orgánicos de Al) es prácticamente nula con valores que no superan el 0,3% del Al total y las bajas relaciones Al_p/Al_o con valores menores de 0,12 establecen que el poco Aluminio activo presente en el suelo se encuentra unido a compuestos amorfos. El oxalato ácido extrajo cantidades más altas que el pirofosfato, esto hace importante la diferencia $Al_o - Al_p$, lo que indica la presencia de Aluminio paracrystalino y no cristalino; aunque no dejan de ser muy bajas en relación al total ($Al_t - Al_o$) de donde se deduce que prácticamente todo el Al (98%) pertenece a las estructuras de los silicatos.

3.4. Análisis mineralógico de las fracciones arena y arcilla.

La fracción arena (0,05-0,25 mm) identificadas por DRX en muestras pulverizadas muestran una composición extremadamente simple y homogénea, con un predominio del cuarzo en todas las muestras de los diferentes sitios y usos en proporciones relativamente constantes (50-64%). Los minerales acompañantes en todos los casos son los feldespatos que representan del 36 al 50%. Otros minerales deben representar porcentajes inferiores al 5% pues no han sido identificados por la técnica utilizada; estos resultados están acordes a los descritos por Malagón y Santana (1997), quienes caracterizando la mineralogía de la fracción arena en suelos de la región Caribe colombiana permitieron diferenciar dos grandes clases de suelos: cuarcíticos y feldespáticos. En suelos de la zona 1 clima cálido húmedo, desarrollados sobre neis y esquistos se presenta un aumento en la cantidad de cuarzo y disminución en los feldespatos con la profundidad, se presentan algunos granos alterados principalmente plagioclasas sericitizadas, feldespatos caolinizados y opacos de alteración. En las demás zonas con suelos derivados de sedimentos coluvio-aluviales y fluvio-marinos, en las áreas cálidas secas, los feldespatos dominan ésta fracción; los componentes dominantes de la fracción arena, de los suelos derivados de granodiorita, cuarzdiorita y granito, en condiciones de clima cálido y seco, se componen principalmente de plagioclasa y feldespato potásico con algo de cuarzo, los cuales disminuyen en profundidad mientras aumentan las micas (Tabla 14).

Tabla 46. Composición semicuantitativa de minerales en la fracción arena fina (% en peso).

Zona	Muestra	Usos	Cuarzo	Feldespatos
1	1	Cultivo de Café	52	42
	2	Bosque	61,1	36
2	3	Cultivo de Palma Africana	67	30
	4	Bosque	58	39
3	5	Suelo arado para siembra	60,9	35
	6	Bosque	61,1	33
4	7	Cultivo de Mango	53,5	41
	8	Cultivo de Banano	64,3	30
	9	Bosque	62,1	31
5	10	Cultivo de Frutales	49,9	45
	11	Bosque	59,8	38
6	12	Cultivo de Hortalizas	58,3	39
	13	Bosque	58	37

Las arcillas presentan una mayor variabilidad mineralógica dentro de una tendencia común en la que las diferencias lógicamente se establecen por sitio y no existen o son prácticamente irrelevantes y aleatorias en la diferenciación por uso del suelo. La composición mineralógica de la fracción fina pone de manifiesto que se trata de una paragénesis de alteración incipiente y con escaso tiempo de evolución hacia condiciones de equilibrio. Junto a minerales primarios lábiles, como la biotita, aparecen minerales neoformados como haloisita y en algunos casos esmectitas (zonas 2 y 4), siempre acompañados por minerales más resistentes como feldespatos y en algunos casos (zonas 2 y 3) por cuarzo.

Los minerales dominantes son los minerales primarios, y de ellos destacan las micas, con predominio de las biotitas, pero con una illitización incipiente y en un caso (zona 3) con una ligera cloritización, muy probablemente heredada de procesos hidrotermales o metamórficos que afectaron a las biotitas. El porcentaje de este mineral, que no se ha identificado en las arenas, representa valores superiores al 60% (60-80% de la fracción arcilla en las zonas 1, 4, 5 y 6, mientras que en las zonas 2 y 3 se encuentra en torno al 30% (Tabla 15). Los feldespatos, otros minerales primarios lábiles en los trópicos húmedos, aunque no tanto en los secos, aparecen en proporciones del 5 al 10% en las zonas 2, 3, 5 y 6, mientras que el cuarzo se encuentra en un porcentaje del orden del 20% en las zonas 2 y 3.

Tabla 47. Datos analíticos de la disolución de equilibrio en mg L⁻¹.

Zona	Muestra	Cuarzo	Goethita	Feldespatos	Biotita	Haloisita	Esmectita	Clorita	Halita
1	1	-	13	-	67	20	-	-	-
	2	-	13	-	63	24	-	-	-
2	3	18	-	13	29	21	13	-	6
	4	24	-	11	30*	13	22	-	-
3	5	21	-	7	33*	34	-	5	-
	6	24	-	12	32	30	-	2	-
4	7	-	-	-	67	30	3	-	-
	8	-	-	-	82	18	-	-	-
	9	-	-	-	63	25	12	-	-
5	10	-	-	9	65	26	-	-	-
	11	-	-	8	65	27	-	-	-
6	12	-	-	7	74	19	-	-	-
	13	-	-	4	75	21	-	-	-

* Ilita

Realizado por Teresa González CSIC. Madrid

Los minerales neoformados que son los indicadores de los procesos de alteración y neoformación y, por tanto, los que señalan la orientación genética de los suelos están

constituidos por haloisita, ubicada en todas las muestras con un porcentaje entre 13 y 30% y esmectitas sólo presentes en las zonas 2 y 4 con porcentajes del 10 al 20%. La presencia de haloisita indica que la alteración ni es excesivamente intensa, ni se han alcanzado condiciones de alta intemperización que estarían representadas por asociaciones de equilibrio con presencia de caolinita, asociada o no con gibbsita y goethita. Como estos minerales no se han identificado, excepto pequeñas cantidades de goethita en la zona 1, se concluye que el grado de alteración es incipiente y que los procesos de neoformación no están favorecidos, produciéndose únicamente una cierta alteración de los feldespatos y biotitas, con formación de un mineral no excesivamente ordenado como es la haloisita, pero sin que exista posibilidad de formas y metaestabilizar compuestos amorfos, de bajo grado de ordenación y elevada reactividad. El drenaje moderado y no excesivamente rápido en el interior del suelo lógicamente no permite la formación de gibbsita, que exigiría tiempos de residencias menores. Además, la práctica ausencia de infiltración, excepto en la zona 1, reduce todavía más los procesos de alteración y neoformación, pudiendo considerarse a los suelos estudiados como *“sistemas abiertos, de alteración incipiente y escasamente sustractivos”*, debido a la ausencia o minimización de las pérdidas por lavado ($ETP > P$ en todos los meses). La presencia de esmectitas en las zonas 2 y 4 debe relacionarse con una reducción del drenaje con la consiguiente ampliación del tiempo de residencia, pero puede ser producida en los suelos actuales o bien en el área fuente de la que proceden los sedimentos.

En términos generales para todas las zonas los minerales dominantes fueron: biotita (62%) y la haloisita con un (24%) no obstante, como se muestra en la Tabla 15 se presentan en menor proporción minerales como: el cuarzo (18-24%) zonas 2 y 3; goethita (13%), en concordancia con las condiciones climáticas húmedas presentes en la zona 1; feldespatos (4-13%) zonas 2,3,5 y 6; esmectitas (3-22%) zonas 2 y 4 caracterizando una mayor evolución pedogenética en estos suelos; clorita (2-5%) zona 3; y halita 6% en la zona 2 suelo cultivado. Los minerales tipo 2:1 dominaron esta fracción en las diferentes zonas, destacando las micas (biotita e illita) como formadores de estructuras básicas para la síntesis de especies arcillosas y a la haloisita del tipo (1:1) como la arcilla dominante y más importante en estos suelos.

En síntesis, para los suelos estudiados de la región del Magdalena y a pesar de las elevadas temperaturas la alteración es escasa y conservativa de minerales lábiles y la neoformación de minerales en equilibrio con las condiciones superficiales está muy

restringida. Todo ello, está claramente relacionado con las características que impone el carácter semiárido a árido derivado del balance de agua.

3.5. Análisis de la disolución de equilibrio.

Para este análisis se tomaron 13 muestras, al igual que las descritas para el análisis mineralógico (Tabla 1). Para establecer las tendencias evolutivas de los suelos y su estado termodinámico actual suele utilizarse la modelización termodinámica de los datos de concentración de la disolución de equilibrio o bien de los datos de la disolución del suelo (Fernández y Macías, 1987). En este caso se ha utilizado la disolución de equilibrio en relación suelo:agua 1:20, obtenida tras agitación de 24 horas y un tiempo de contacto de 10 días en condiciones de laboratorio. Usualmente se utiliza un tiempo de contacto menor, pero dadas las características topográficas de la mayor parte de los suelos (planicies con depósitos aluviales y marinos) se ha aumentado el tiempo de residencia para acercarse más a las condiciones propias de los sistemas reales.

Las disoluciones de equilibrio fueron filtradas por 0,45 micras y analizadas. Las determinaciones realizadas fueron: pH, CE y concentración de cationes Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, NH₄ y aniones: sulfato, carbonato, fosfato, nitrato, fluoruro, y silicio. Indica brevemente los métodos de análisis. Estos datos fueron utilizados para el cálculo de actividades mediante el programa Phreeck. Los datos de entrada de la Tabla 16, ponen de manifiesto que se trata de disoluciones de tendencia alcalina (pH 6,8-7,9) con baja conductividad eléctrica (60-260 $\mu\text{S cm}^{-1}$). Los iones dominantes son bicarbonato y calcio, apareciendo como secundarios cloruro y sulfatos entre los aniones y sodio y, en menor medida, magnesio entre los cationes.

Tabla 48. Datos analíticos de la disolución de equilibrio en mg L^{-1} .

MUESTRAS	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4			ZONA 5		ZONA 6	
	C	B	C	B	C	B	C	C	B	C	B	C	B
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CE (dsm m ⁻¹)	0,06	0,26	0,07	0,09	0,12	0,15	0,14	0,09	0,18	0,09	0,14	0,18	0,20
pH	6,8	7,3	7,4	7,5	7,8	7,5	7,4	7,4	7,8	7,5	7,9	7,8	7,8
PO ₄ ⁻³	0,13	0,04	2,10	0,13	1,17	0,68	0,09	0,79	0,61	1,75	1,67	1,30	3,38
Cl ⁻	3,25	2,76	0,85	0,82	0,94	5,35	6,04	5,55	1,55	0,95	0,77	1,19	0,91
SO ₄ ⁻²	2,78	5,61	3,4	3,51	2,92	3,22	5,57	4,35	4,57	2,48	5,07	2,8	2,58
HCO ₃ ⁻	24,3	20,6	31,6	45,0	50,0	68,0	48,6	28,0	50,0	51,0	76,5	86,3	110,5
K ⁺	1,58	2,62	7,60	4,00	3,27	2,06	1,37	2,31	2,88	3,35	2,31	6,93	11,12
Na ⁺	1,90	20,09	0,92	7,90	4,53	9,44	8,21	5,14	5,88	1,58	4,17	4,34	8,53
Ca ⁺²	6,2	18,2	6,4	6,8	13,4	13,6	13,8	10,0	23,8	13,2	20,0	25,6	24,4
Mg ⁺²	1,0	3,8	1,4	1,8	3,0	3,4	2,4	1,8	3,8	1,6	3,2	3,6	3,2
Fe	0,07	0,01	0,04	0,38	0,02	0,02	0,02	0,06	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01
Si ⁺⁴	1,17	2,36	1,3	5,57	3,9	3,93	4,73	4,69	4,83	3,28	4,59	5,56	6,13
Al ⁺³	<1	<1	<1	0,70	0,44	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,68	0,50
F ⁻	0,074	0,06	0,116	0,129	0,115	0,174	0,143	0,204	0,196	0,142	0,2	0,064	0,05
NH ₄ ⁺	1,03	0,56	0,67	3,04	2,68	0,67	1,14	0,69	1,65	0,69	1,14	0,59	0,59

C= suelo cultivado; B= suelo de bosque.

Caracterización geoquímica de la disolución de equilibrio de los suelos.

Para realizar la caracterización geoquímica de la disolución de equilibrio de los suelos y establecer la modelización termodinámica que permite analizar la dinámica actual y las tendencias evolutivas de estos sistemas, se ha obtenido la disolución de equilibrio 6 días en relación 1:20 y realizado las determinaciones analíticas que permiten establecer un cálculo de las actividades de los diferentes iones. Los principales datos analíticos se presentan en la Tabla 16.

La reacción de las disoluciones de equilibrio es en todos los casos, próxima a la neutralidad (6,8-7,9), lo que indica que deben estar controladas por los cationes de cambio de carácter básico y, quizás, en algún caso por carbonatos. Se observa un pequeño incremento del pH de las zonas de mayor pluviometría (zona 1, 2000 mm de Precipitación, pH: 6,8-7,3) respecto a las más secas (zonas 4-6, P < 1000 mm; pH: 7,4-7,9). Salvo en el suelo arado, el cultivo tiene un pH ligeramente inferior. La conductividad eléctrica no es muy elevada, poniendo de manifiesto que estos suelos no tienen sales libres ni componentes de elevada solubilidad. Son aguas bicarbonatadas, con bajos niveles de otros aniones como cloruros y sulfatos. Sin embargo, son relativamente altos los niveles de fosfatos, especialmente en los suelos de las zonas más secas y en el cultivo de Palma, siendo lógicamente los valores más

bajos los de la zona de bosque con mayor pluviometría y reacción más baja. El catión dominante es el Ca, seguido del Na y, al igual que en los otros iones los valores más altos para todos los cationes se producen en los suelos de las zonas más secas. Apenas hay Fe en disolución y, tal como se observa en el diagrama Eh-pH (figura 4) las condiciones son de formación de ferrihidrita que lógicamente evolucionará hacia la goethita o la hematita. Sin embargo, dada la pequeña cantidad de Fe libre formado y las condiciones de pH su tendencia debe ser hacia una rápida cristalización. El contenido de Si supera en todos los casos la concentración de equilibrio del cuarzo excepto en las zonas más húmedas (2-3 mg l⁻¹), donde se encuentra en equilibrio. Con estos datos puede concluirse que las disoluciones de los suelos al noreste del departamento del Magdalena se caracterizan por ser bicarbonatadas cálcicas, ligeramente silícicas, correspondientes a las zonas de suelos circum-neutros y ligeramente sódicas, que se corresponden con los suelos de mayor potencialidad productiva siempre que estén bien provistos de P y N.

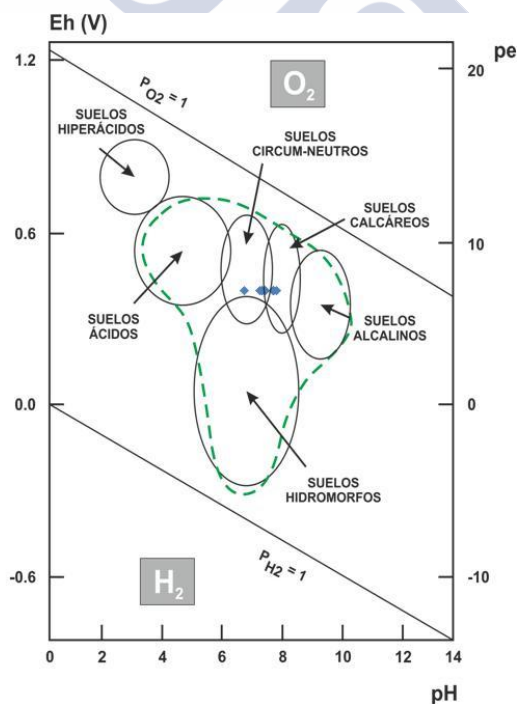


Figura 31. Diagrama Eh-pH (diagrama de Pourvaix) con la situación de las disoluciones de equilibrio de los suelos del Magdalena.

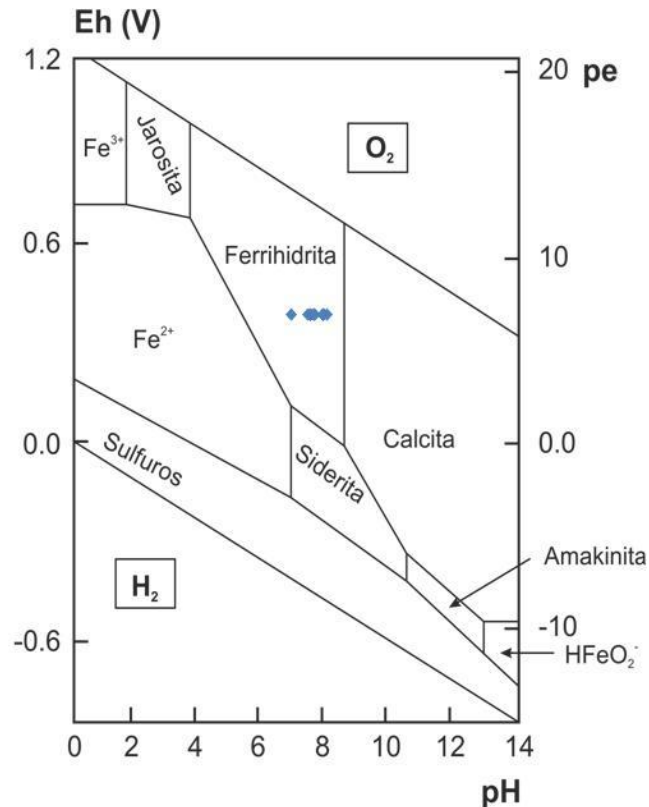


Figura 32. Las condiciones de la disolución de los suelos estudiados conducen a la formación de ferrihidrita y, su rápida evolución hacia la goethita o la hematita en todos los casos.

Modelización termodinámica de la disolución de equilibrio de los suelos de la región noreste del Magdalena.

A partir de los datos obtenidos de las concentraciones de todos los parámetros necesarios para el cálculo de actividades de las diferentes especies iónicas se ha realizado la modelización termodinámica utilizando el programa de cálculo Phreeck.

Los resultados de este programa permiten conocer la actividad de las diferentes especies iónicas que pueden presentarse en el sistema suponiendo condiciones de equilibrio termodinámico. Sólo se han considerado como significativas las especies cuya actividad es superior a 10^{-6} . Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 49. Especies de mayor actividad en las aguas pésimas del complejo de ENUSA.

Muestra	Actividad					Muestra	Actividad				
	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07		1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07
Café	H ₂ CO ₃	Al(OH) ₄ ⁻	Fe ⁺²	MgHCO ₃ ⁺		Bosque	Mg ⁺²	Al(OH) ₃	MgSO ₄	NaHCO ₃	
	Ca ⁺²	Al(OH) ₃	Al(OH) ₂ ⁺	H ⁺			HCO ₃ ⁻	Al(OH) ₄ ⁻	CaHCO ₃ ⁺	CaCO ₃	
	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	F ⁻	MgSO ₄			Ca ⁺²	NH ₄ ⁺	F ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	
		Mg ⁺²		NH ₃			Na ⁺	H ₂ CO ₃	CaSO ₄	HPO ₄ ⁻²	
		K ⁺		HPO ₄ ⁻²				SO ₄ ⁻²		NaSO ₄ ⁻	
		H ₄ SiO ₄		CaHCO ₃ ⁺				K ⁺		H ₃ SiO ₄ ⁻	
		NH ₄ ⁺		CaSO ₄				Cl ⁻		OH ⁻	
		Na ⁺		H ₂ PO ₄ ⁻				H ₄ SiO ₄		CO ₃ ⁻²	
		Cl ⁻								NH ₃	
										MgHCO ₃ ⁺	
								Al(OH) ₂ ⁺			
Palma	Ca ⁺²	Al(OH) ₃	F ⁻	CaCO ₃		Bosque	Ca ⁺²	Al(OH) ₄ ⁻	Fe(OH) ₃	NaHCO ₃	
	K ⁺	HPO ₄ ⁻²	H ₂ PO ₄ ⁻	H ₃ SiO ₄ ⁻			NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Fe ⁺²	Al(OH) ₂ ⁺	
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		Fe ⁺²			H ₄ SiO ₄	SO ₄ ⁻²	NH ₃	CaCO ₃	
		Al(OH) ₄ ⁻		OH ⁻			Na ⁺	H ₂ CO ₃	Fe(OH) ₂ ⁺	OH ⁻	
		SO ₄ ⁻²		MgSO ₄			HCO ₃ ⁻	Mg ⁺²	Al(OH) ₃	MgSO ₄	
		NH ₄ ⁺		MgHCO ₃ ⁺				K ⁺	F ⁻	Fe(OH) ₄ ⁻	
		Na ⁺		Fe(OH) ₂ ⁺						H ₂ PO ₄ ⁻	
		H ₂ CO ₃		Al(OH) ₂ ⁺						MgHCO ₃ ⁺	
		H ₄ SiO ₄		MgHPO ₄						H ₃ SiO ₄ ⁻	
		Mg ⁺²		NH ₃						HPO ₄ ⁻²	
				CO ₃ ⁻²						CaSO ₄	
				CaHCO ₃ ⁺						CO ₃ ⁻²	
				CaSO ₄						CaHCO ₃ ⁺	
				CaHPO ₄							

Muestra	Actividad					Muestra	Actividad				
	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07		1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07
S. Arado	Mg ⁺²	Al(OH) ₄ ⁻	H ₃ SiO ₄ ⁻	Fe(OH) ³		Bosque	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	MgHCO ₃ ⁺	MgCO ₃	
	NH ₄ ⁺	SO ₄ ⁻²	CaHPO ₄	Fe(OH) ₂ ⁺			H ₄ SiO ₄	Al(OH) ₄ ⁻	CaSO ₄	Fe(OH) ₂ ⁺	
	H ₄ SiO ₄	Cl ⁻	CaSO ₄	CaPO ₄ ⁻			Cl ⁻	NH ₄ ⁺	CO ₃ ⁻²	Al(OH) ₂ ⁺	
	Na ⁺	H ₂ CO ₃	H ₂ PO ₄ ⁻	MgCO ₃			Ca ⁺²	K ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	NaHCO ₃	
	Ca ⁺²	K ⁺	Al(OH) ₃	MgSO ₄			Na ⁺	H ₂ CO ₃	CaHCO ₃ ⁺	MgHPO ₄	
	HCO ₃ ⁻		CaHCO ₃ ⁺	MgHPO ₄			HCO ₃ ⁻		HPO ₄ ⁻²	OH ⁻	
		CO ₃ ⁻²	OH ⁻				Al(OH) ₃	H ₃ SiO ₄ ⁻			
		NH ₃	CaCO ₃				F ⁻	MgSO ₄			
		F ⁻	MgHCO ₃ ⁺					CaHPO ₄			
								CaCO ₃			
								NH ₃			
Mango	Cl ⁻	Al(OH) ₃	CaHCO ₃ ⁺	Fe ⁺²							
	H ₄ SiO ₄	Al(OH) ₄ ⁻	CaSO ₄	NaHCO ₃							
	Ca ⁺²	K ⁺	F ⁻	Fe(OH) ₂ ⁺							
	Na ⁺	SO ₄ ⁻²		OH ⁻							
	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺		H ₂ PO ₄ ⁻							
		H ₂ CO ₃		Al(OH) ₂ ⁺							
		Mg ⁺²		CaCO ₃							
				HPO ₄ ⁻²							
				H ₃ SiO ₄ ⁻							
				MgSO ₄							
				MgHCO ₃ ⁺							
			CO ₃ ⁻²								
			NH ₃								

Capítulo 3. Variabilidad de los Suelos

Muestra	Actividad					Muestra	Actividad				
	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07		1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07
Banano		Cl ⁻	Al(OH) ₃	CaSO ₄	Fe(OH) ₃	Bosque		Mg ⁺²	H ₂ CO ₃	MgHCO ₃ ⁺	NaHCO ₃
		H ₄ SiO ₄	F ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	CaCO ₃			H ₄ SiO ₄	Al(OH) ₄ ⁻	H ₃ SiO ₄ ⁻	Fe(OH) ₃
		Ca ⁺²	Al(OH) ₄ ⁻	HPO ₄ ⁻²	MgHPO ₄			Na ⁺	SO ₄ ⁻²	CaCO ₃	CaPO ₄ ⁻
		Na ⁺	H ₂ CO ₃		OH ⁻			Ca ⁺²	Cl ⁻	CO ₃ ⁻²	Fe(OH) ₂ ⁺
		HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺		MgHCO ₃ ⁺			HCO ₃ ⁻	K ⁺	NH ₃	MgCO ₃
			SO ₄ ⁻²		Al(OH) ₂ ⁺				NH ₄ ⁺	HPO ₄ ⁻²	MgHPO ₄
			K ⁺		Fe ⁺²					CaSO ₄	OH ⁻
			Mg ⁺²		MgSO ₄					CaHCO ₃ ⁺	MgSO ₄
					Fe(OH) ₂ ⁺					Al(OH) ₃	H ₂ PO ₄ ⁻
					CO ₃ ⁻²					F ⁻	CaHPO ₄
					CaHPO ₄						
					H ₃ SiO ₄ ⁻						
					NH ₃						
					CaHCO ₃ ⁺						
Frutales		H ₄ SiO ₄	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	CaPO ₄ ⁻	Bosque	HCO ₃ ⁻	Mg ⁺²	Cl ⁻	MgHCO ₃ ⁺	NaHCO ₃
		Ca ⁺²	Cl ⁻	CaSO ₄	MgSO ₄			H ₄ SiO ₄	Al(OH) ₄ ⁻	H ₃ SiO ₄ ⁻	MgPO ₄ ⁻
		HCO ₃ ⁻	Al(OH) ₄ ⁻	CaHPO ₄	Al(OH) ₂ ⁺			Na ⁺	H ₂ CO ₃	H ₂ PO ₄ ⁻	Fe(OH) ₄ ⁻
			NH ₄ ⁺	CaHCO ₃ ⁺	OH ⁻			Ca ⁺²	SO ₄ ⁻²	CaHPO ₄	Fe(OH) ₃
			H ₂ CO ₃	H ₂ PO ₄ ⁻	MgHPO ₄				K ⁺	CaCO ₃	Fe(OH) ₂ ⁺
			Mg ⁺²	F ⁻	CaCO ₃				NH ₄ ⁺	NH ₃	CaPO ₄ ⁻
			Na ⁺	Al(OH) ₃	H ₃ SiO ₄ ⁻					CaSO ₄	MgCO ₃
			K ⁺	HPO ₄ ⁻²	MgHCO ₃ ⁺					Al(OH) ₃	MgSO ₄
					NH ₃					CO ₃ ⁻²	MgHPO ₄
										CaHCO ₃ ⁺	OH ⁻
								HPO ₄ ⁻²			
								F ⁻			

Muestra	Actividad					Muestra	Actividad				
	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07		1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07
Hortaliza	HCO ₃ ⁻	Mg ⁺²	Al(OH) ₄ ⁻	NH ₃	Fe(OH) ₃	Bosque	HCO ₃ ⁻	Mg ⁺²	Al(OH) ₄ ⁻	NH ₃	MgPO ₄ ⁻
		K ⁺	SO ₄ ⁻²	H ₃ SiO ₄ ⁻	NaHCO ₃			H ₄ SiO ₄	HPO ₄ ⁻²	MgHPO ₄	NaHCO ₃
		Na ⁺	NH ₄ ⁺	MgHCO ₃ ⁺	Fe(OH) ₂ ⁺			K ⁺	SO ₄ ⁻²	H ₃ SiO ₄ ⁻	MgSO ₄
		H ₄ SiO ₄	Cl ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	CaPO ₄ ⁻			Na ⁺	Cl ⁻	CaSO ₄	MgCO ₃
		Ca ⁺²	H ₂ CO ₃	CaHPO ₄	CaPO ₄ ⁻			Ca ⁺²	NH ₄ ⁺	MgHCO ₃ ⁺	OH ⁻
				CaSO ₄	MgCO ₃				H ₂ CO ₃	Al(OH) ₃	CaPO ₄ ⁻
				CaCO ₃	MgSO ₄					F ⁻	
				F ⁻	MgHPO ₄					CaCO ₃	
				Al(OH) ₃	OH ⁻					H ₂ PO ₄ ⁻	
				CO ₃ ⁻²						CaHPO ₄	
				CaHCO ₃ ⁺						CO ₃ ⁻²	
				HPO ₄ ⁻²						CaHCO ₃ ⁺	



Dejando aparte el agua, las especies que se presentan con una actividad de 10^{-2} permite discriminar las disoluciones de equilibrio en dos grupos: los que presentan alguna especie (siempre es el ión HCO_3^-) con actividad del orden de 10^{-2} y los que sólo presentan especies con actividad del orden de 10^{-3} . En el primer caso, aguas fuertemente bicarbonatadas se encuentran los suelos de las zonas más secas (zonas 5 y 6) tanto en los cultivos como en el bosque. En el segundo caso, se encuentran los suelos de todas las demás zonas. Las diferencias entre las especies más activas son pequeñas tanto en relación con la altitud y precipitación como en el tipo de uso. En todas las muestras son los iones bicarbonato los aniones dominantes siendo el Ca^{+2} el contra-ión que aparece en todos los casos con una actividad del orden de 10^{-3} . Otros aniones aparecen en algunas muestras con actividades de este orden. Así, la especie H_4SiO_4 (que representa la actividad del Si) aparece en todos los suelos con actividad de 10^{-3} , excepto en el suelo de la zona más elevada y con mayores precipitaciones y en el cultivo de palma. El ión Cl^- sólo se encuentra con esta elevada actividad en los suelos de la zona 4 cultivados, pero no en el bosque, indicando probablemente un mayor carácter evaporítico de estos suelos cultivados con mango y banano, que son los que menos precipitación reciben (750 mm) y se encuentran prácticamente al nivel del mar (15 m). Respecto a los cationes, junto al Ca^{+2} que aparece en todos los casos, hay otros que son casi ubicuos en todos los suelos. Así el Na^+ se encuentra en todos los suelos con vegetación de bosque en todas las zonas con actividad de 10^{-3} , poniendo de manifiesto que, después del Ca^{+2} es el ión de mayor actividad en los suelos de la zona con vegetación natural. En los suelos cultivados sólo presenta esta actividad en la zona 4, que, como ya hemos dicho es una de las de menos precipitación y, por tanto, con menos lavado de bases. Mg^{+2} se presenta en suelos de bosque de las zonas 1, 3, 4,5 y 6, pero no en los cultivos, lo que indica una cierta relación con la vegetación de bosque, probablemente menos extractora de este elemento que los cultivos. Más raros el ión K^+ , sólo presente con actividades de este orden en la zona 6 y en el cultivo de palma de la zona 2 y el ión NH_4^+ que sólo se encuentra con elevada actividad en el bosque de la zona 2 y el suelo arado de la zona 3.

El análisis de las especies de mayor actividad (10^{-2} - 10^{-3}) confirma las tendencias indicadas. Las disoluciones del suelo son bicarbonatadas cálcicas, siendo la presencia de Na^+ y Si las segundas en importancia a la hora de caracterizar la composición de la disolución del suelo. Se observan diferencias entre bosque y cultivo, especialmente en la presencia de Na^+ y Mg^{+2} , siempre más importantes en el bosque.

El análisis de las especies presentes en el rango de 10^{-4} permite identificar la generalización de los iones que aparecían en el rango anterior ocasionalmente como NH_4^+ , K^+ , Mg^{+2} , Cl^- , etc., y la aparición prácticamente en todos los casos de las especies sulfato y de aluminio, siendo las más hidroxiladas las presentes $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$. Esto indica que no hay ningún riesgo de toxicidad por Al ácido, pero sí pueden empezar a aparecer pequeños problemas ambientales por el incremento de solubilidad de Al en condiciones alcalinas (de hecho la concentración de Al supera en todas las muestras la concentración de 0,1 mg/l a partir de la cual pueden comenzar a aparecer problemas en los organismos acuáticos., pues el ión aluminato tiene alguna toxicidad y, sobre todo, su ingesta no es recomendable por lo que supone de introducción de este elemento en el organismo. Sólo en dos disoluciones aparece con este rango de actividad una especie fosfatada (HPO_4^-), cultivo de palma de la zona 2 y bosque de la zona 6. El primero puede ser debido a las prácticas de abonado.

El rango de actividad de 10^{-5} permite observar la aparición de abundantes pares y complejos iónicos como CaSO_4 , CaHPO_4 , MgHCO_3^+ y la aparición de algunos iones de Fe. No parece, por tanto, que exista un problema de carencia de P significativo, pues prácticamente todos los suelos lo presentan con este actividad y en algunos es mayor; no obstante dada las condiciones de pH, la disponibilidad de formas de P para las plantas se ve muy reducida.

En síntesis, la modelización de la especiación en condiciones de equilibrio permite obtener las siguientes conclusiones:

Las disoluciones presentan actividades elevadas de iones HCO_3^- y, en menor medida de Ca^{+2} , a las que siguen en importancia la presencia de Na^+ y Si (H_4SiO_4). K^+ y Mg^{+2} son menos abundantes, pero no parece que haya problemas excepto para cultivos de alta demanda. Tampoco se aprecia una carencia significativa de P, No hay toxicidad por Al ácido, aunque sí pueden aparecer algunos excesos de absorción de este elemento en forma de ión aluminato en los suelos de pH más elevado.

Teniendo en cuenta esto los sistemas que más información suministran sobre la modelización de las disoluciones de los suelos estudiados es el sistema $\text{SO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, que puede ser interpretado por aproximaciones sucesivas, teniendo en cuenta que los resultados son variables dependiendo de la solubilidad (energía libre) que se considere para la caolinita, que es el mineral con mayores diferencias de energía libre según el grado de cristalinidad y

las sustituciones isomórficas Al-Fe presentes. En la figura 6 se observa que todas las muestras están saturadas tanto respecto a minerales de bajo grado de orden como cristalinas e incluso hay sobresaturación de cuarzo en la mayor parte de los casos. En todas las muestras el mineral más estable termodinámicamente es la caolinita, pero también en todas ellas no está muy lejos la estabilidad de la pirofilita, que, en el diagrama de este sistema, puede utilizarse para estimar la estabilidad de los filosilicatos 2:1. Son formas metaestables: todas las demás: Microgibbsita, gibbsita, alófanas, imogolita, halloisitas y pirofilita, por lo que cualquiera de ellas puede estar formándose o haberse formado para evolucionar con el tiempo hacia la caolinita. Teniendo en cuenta el escaso desarrollo de los suelos es posible que la secuencia de formación siga el orden: Gibbsita, Imogolita, Halloisita, Caolinita, con la posible formación en equilibrio de minerales 2:1.

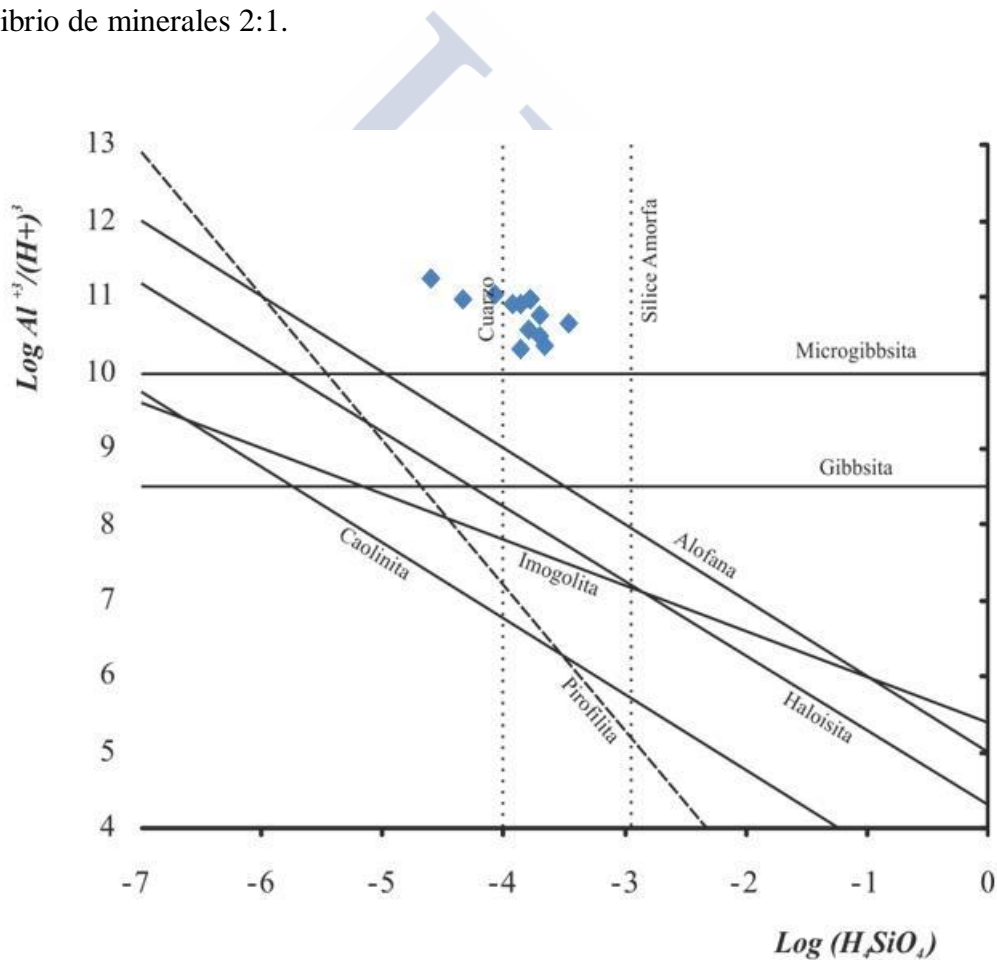


Figura 33. Diagrama de equilibrio del sistema SiO₂-Al₂O₃-H₂O con las ecuaciones correspondientes a minerales de alto y bajo grado de orden.

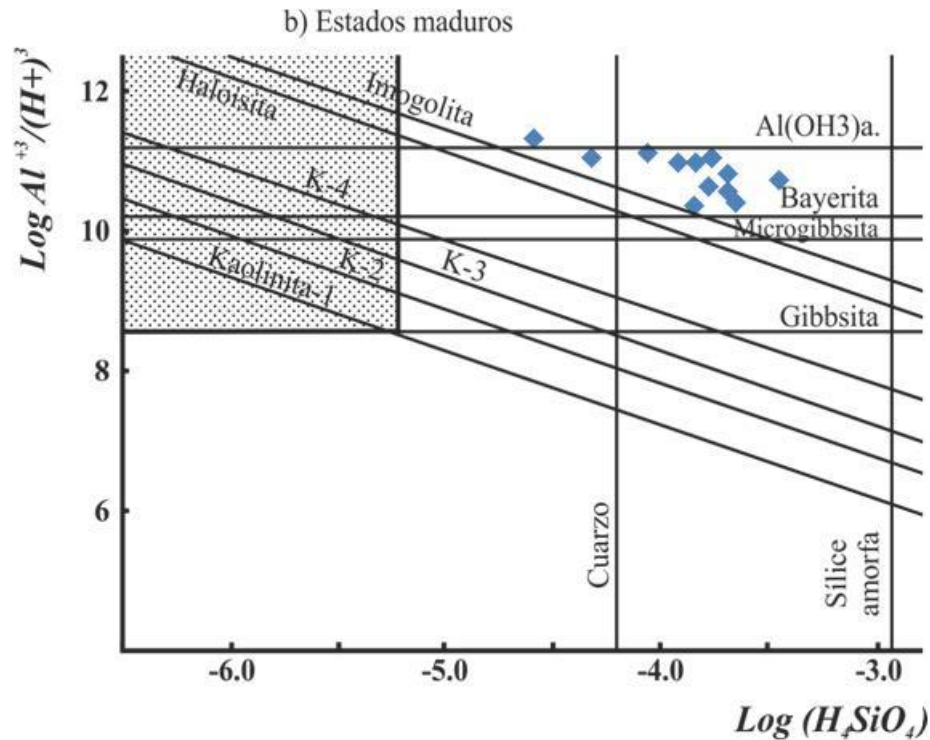


Figura 34. Las disoluciones están sobresaturadas en prácticamente todos los minerales del sistema y controladas por una forma de Al hidroxilada de bajo grado de orden.

Lo mismo se observa en la figura 7 donde se aprecia además, que la mayor parte de las disoluciones están controladas por una forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ de baja cristalinidad (éntrela bayerita y la alúmina amorfa), lo que permite confirmar la hipótesis de formación inicial de gibbsita y el posterior enriquecimiento en Si que conduce la paragénesis mineral hacia los filosilicatos. De estos, el diagrama Eh-pH de barreras geoquímicas (figura 8), propuesto por Macías y Chesworth, (1980) permite apreciar que, aunque los minerales del grupo de la caolinita son los más estables, prácticamente todas las muestras presentan condiciones de formación de minerales 2:1. El mismo diagrama de barreras confirma la inestabilidad de la materia orgánica y la estabilidad de goethita y formas oxidadas de azufre (SO_4^-). La calcita sólo está en equilibrio en las muestras de pH más elevado que corresponden a las zonas más secas de la región.

El cálculo de los índices de saturación mineral nos permite realizar algunas consideraciones sobre los minerales en equilibrio y la forma de mayor estabilidad en que se presentarán los diferentes elementos en condiciones de equilibrio, (Tabla 18). Se aprecia que hay muchos minerales secundarios que tienen índices de saturación positivo y que, por tanto, podrían neoformarse en estos suelos tal como se ha visto con los diagramas de equilibrio. Sin embargo, también destaca el hecho de muchos minerales primarios lábiles, como albita o

anortita, entre otros, están sobresaturados por lo que no deben tener una gran tendencia a la alteración. Es posible que las altas temperaturas, unidas a una pluviometría relativamente escasa y, en cierto modo episódica, conduzcan a sistemas con pH neutro a alcalino con escasa tendencia alterante y una cierta conservación o durabilidad de los minerales primarios, incluso la mayor labilidad.

En síntesis, la modelización termodinámica confirma que los suelos del Magdalena están muy poco meteorizados, que presentan un bajo grado evolutivo y que las condiciones de los sistemas de alteración con pH alto y escasa presencia de agua permiten la conservación durante más tiempo de los minerales de mayor labilidad. La tendencia de neoformación se dirige hacia la caolinita, como mineral más estable, pero como la disolución está controlada por las formas de bajo grado de orden del hidróxido de Al y las actividades del Si y los cationes alcalinos son relativamente elevadas, pueden encontrarse y neoformarse en estos suelos incipientes otros minerales como gibbsita, formas de bajo grado de orden de los minerales del grupo de la caolinita e incluso minerales 2:1.



Tabla 50. Índices de saturación mineral en las disoluciones de los suelos del Magdalena.

Fase	Formulación	CAFE	BOSQUE	PALMA	BOSQUE	S. ARADO	BOSQUE	MANGO	BANANO	BOSQUE	FRUTALES	BOSQUE	HORTALIZAS	BOSQUE
Al(OH) ₃ (a)	Al(OH) ₃	11,32	11,07	11,01	10,78	10,33	10,93	11,01	11,01	10,68	10,93	10,6	10,52	10,38
Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄	Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄	27,06	25,33	24,71	23,6	21,1	24,14	24,88	24,8	22,69	24,05	22,19	21,8	21,2
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	0,88	3,06	0,99	3,69	2,82	3,46	3,61	3,4	3,57	2,45	3,36	3,45	3,73
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	23,61	25,16	24,28	25,31	24,98	25,59	25,71	25,58	26,11	25,44	26,01	25,92	25,7
Boehmite	AlOOH	11,32	11,07	11,01	10,78	10,33	10,93	11,01	11,01	10,68	10,93	10,6	10,52	10,38
Brucite	Mg(OH) ₂	9,16	10,71	10,49	10,8	11,61	11,06	10,71	10,6	11,7	10,74	11,82	11,67	11,61
Ca-Nontronite	Fe ₂ Al _{0,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0,165}	0,02	2,06	2,63	7,15	4,5	4,12	4,13	5,05	5	3,24	5,57	5,17	4,66
Diaspore	AlOOH	11,32	11,07	11,01	10,78	10,33	10,93	11,01	11,01	10,68	10,93	10,6	10,52	10,38
Ferrihydrite	Fe(OH) ₃	5,38	5,76	6,55	7,67	6,64	6,39	6,25	6,73	6,64	6,09	6,97	6,63	6,33
Gibbsite(C)	Al(OH) ₃	11,32	11,07	11,01	10,78	10,33	10,93	11,01	11,01	10,68	10,93	10,6	10,52	10,38
Goethite	FeOOH	5,38	5,76	6,55	7,67	6,64	6,39	6,25	6,73	6,64	6,09	6,97	6,63	6,33

Capítulo 3. Variabilidad de los Suelos

Fase	Formulación	CAFE	BOSQUE	PALMA	BOSQUE	S. ARADO	BOSQUE	MANGO	BANANO	BOSQUE	FRUTALES	BOSQUE	HORTALIZAS	BOSQUE
Halloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	13,87	13,99	13,35	14,16	12,94	14,15	14,46	14,46	13,83	14	13,61	13,62	13,43
Hematite	Fe_2O_3	10,76	11,52	13,1	15,35	13,28	12,78	12,49	13,45	13,27	12,18	13,93	13,27	12,66
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	13,87	13,99	13,35	14,16	12,94	14,15	14,46	14,46	13,83	14	13,61	13,62	13,43
K-Nontronite	$Fe_2Al_{.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2K_{0.33}$		1,24	2,03	6,47	3,74	3,29	3,24	4,26	4,17	2,48	4,72	4,46	4,04
Larnite	Ca_2SiO_4	15,09	18,26	17,54	18,61	20,22	19,03	18,73	18,47	20,79	18,95	21,01	20,9	20,88
Lepidocrocite	$FeOOH$	5,38	5,76	6,55	7,67	6,64	6,39	6,25	6,73	6,64	6,09	6,97	6,63	6,33
Maghemite	Fe_2O_3	10,76	11,52	13,1	15,35	13,28	12,78	12,49	13,45	13,27	12,18	13,93	13,27	12,66
Magnetite	Fe_3O_4	18,37	19,02	21,28	24,56	21,15	20,7	20,37	21,81	21,14	19,8	22,03	21,13	20,23
Mg-Nontronite	$Fe_2Al_{.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2Mg_{0.165}$		1,99	2,55	7,09	4,43	4,06	4,04	4,97	4,9	3,12	5,47	5,06	4,55
Microcline	$KAlSi_3O_8$	0,57	1,95	1,68	3,16	2,45	2,57	2,61	2,83	3,03	2,55	2,87	3,42	3,61
Montmorillonite	$Mg_{0.485}Fe_{.22}Al_{1.71}Si_{3.81}O_{10}(OH)_2$	8,29	9,86	8,84	11,25	10,05	10,77	11,01	11,05	11,05	10,26	10,95	10,98	10,81
Muscovite	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	23,2	24,09	23,69	24,73	23,11	24,43	24,62	24,84	24,4	24,41	24,07	24,46	24,37

Fase	Formulación	CAFE	BOSQUE	PALMA	BOSQUE	S. ARADO	BOSQUE	MANGO	BANANO	BOSQUE	FRUTALES	BOSQUE	HORTALIZAS	BOSQUE
Na-Nontronite	$\text{Fe}_2\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{Na}_{0,33}$		1,61	1,81	6,64	3,86	3,58	3,57	4,45	4,35	2,44	4,89	4,47	4,07
Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,11	5,84	4,67	6,75	5,22	6,44	6,91	6,9	6,3	6,13	6,03	6,21	6,1
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,95	15,82	14,14	17,58	19,38	17,75	17,04	16,68	20,03	16,49	20,3	20,18	20,17



4. Conclusiones

Los contenidos de Carbono Total son afectados negativamente por los cambios de usos del suelo en las zonas estudiadas.

En términos generales el uso y manejo de los suelos cultivados afectó los contenidos de de las diferentes formas de Fe.

Los contenidos medios de las diferentes extracciones de Fe y Al fueron mayores para suelos de bosques en relación a los suelos de Cultivo.

Las condiciones climáticas de la zona 1 determinaron los mayores contenidos de Fe en sus diferentes formas.

Las formas de hierro lábiles o más reactivas (cristalinas, amorfas y ligadas a la MO) solo representaron el 29,3% del hierro total para suelos de cultivo y el 35,9% para suelos de bosque.

El manejo de los suelos de cultivo incrementó la proporción de formas no lábiles ó silicatadas de hierro.

En los suelos estudiados se presentó una limitada afinidad del Fe con la MO, esto debe relacionarse con el hecho de que todos los suelos estudiados presentaron en su mayoría reacción neutra o alcalina, bajo porcentaje de MO y predominio de humus joven con baja capacidad para la formación de complejos.

El 98% del Al corresponde a la estructura de los silicatos, sin mucha influencia en las condiciones de los suelos estudiados.

De acuerdo a la caracterización mineralógica, los suelos de las áreas cálidas tienen fertilidad moderada ya que la fracción gruesa presenta cantidades moderadas de feldspatos. La fracción fina del suelo está integrada por proporciones bajas de haloisita y presencia significativa de micas (biotita).

Las disoluciones de equilibrio de los suelos de la zona del Magdalena se caracterizan por ser bicarbonatadas cálcicas, ligeramente silícicas y ligeramente sódicas, correspondiendo a las zonas de suelos circum-neutros a calcáreos.

Las disoluciones de equilibrio presentan actividades elevadas de iones HCO_3^- (10^{-2} - 10^{-3}) y, en menor medida de Ca^{+2} (10^{-3}), a las que siguen en importancia la presencia de Na^+ y Si (H_4SiO_4). K^+ y Mg^{+2} son menos abundantes, pero no parece que haya problemas de carencias significativas excepto para cultivos de alta demanda. Tampoco se aprecia una carencia importante de P, No hay toxicidad por Al ácido, aunque sí pueden aparecer algunos excesos de absorción de este elemento en forma de ión aluminato en los suelos de pH más elevado.

La modelización termodinámica confirma que los suelos del Magdalena están muy poco meteorizados y presentan un bajo grado evolutivo. Las condiciones de los sistemas de alteración, con pH alto y escasa durabilidad de la presencia de agua, permiten la conservación durante más tiempo de los minerales de mayor labilidad. La tendencia de neoformación se dirige hacia la caolinita, como mineral termodinámicamente más estable, pero como la disolución está controlada por las formas de bajo grado de orden del hidróxido de Al y las actividades del Si y los cationes alcalinos son relativamente elevadas, pueden encontrarse y neoformarse en estos suelos incipientes otros minerales como gibbsita, formas de bajo grado de orden de los minerales del grupo de la caolinita e incluso minerales 2:1 en formas metaestables, mientras que la caolinita aparecería fundamentalmente en fases de evolución edáfica más avanzada.

El diagrama de barreras geoquímicas confirma que las condiciones Eh-pH están por encima de la barrera de estabilidad de la materia orgánica, incluso de las formas de mayor estabilidad, por lo que la tendencia de los sistemas edáficos se dirige hacia la mineralización de la materia orgánica de forma muy rápida. La escasa presencia de iones y coloides de Fe y Al favorece esta tendencia, pues sólo el Ca^{+2} puede actuar como floculante y estabilizante.

Anexos

Anexo 1. Pruebas de Tukey para diferentes propiedades.

pH

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
6	Bosque	8,70	A
6	Cultivo	8,60	A
4	Bosque	7,80	AB
5	Bosque	7,13	BC
4	Cultivo	7,10	BC
5	Cultivo	7,08	BC
3	Bosque	7,03	BC
1	Bosque	6,50	CD
3	Cultivo	6,50	CD
2	Cultivo	6,30	CD
2	Bosque	5,63	D
1	Cultivo	5,60	D

MO

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
1	Bosque	6,635	A
5	Bosque	5,5425	AB
1	Cultivo	4,425	ABC
4	Cultivo	3,0025	BC
3	Bosque	2,825	BC
4	Bosque	2,815	BC
2	Bosque	2,7975	BC
6	Bosque	2,6225	BC
2	Cultivo	2,255	C
6	Cultivo	2,17	C
3	Cultivo	1,9825	C
5	Cultivo	1,975	C

Al total

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
2	Bosque	4,0425	A
3	Cultivo	3,6825	AB
3	Bosque	3,4075	AB
1	Cultivo	3,275	ABC
4	Cultivo	3,2162	ABC
4	Bosque	3,1675	ABC
1	Bosque	3,02	BCD
5	Bosque	2,32	CDE
5	Cultivo	2,16	DE
6	Bosque	2,05	E
6	Cultivo	1,845	E
2	Cultivo	0,745	F

K

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
4	Cultivo	25,189	A
1	Cultivo	20,858	AB
4	Bosque	18,6	ABC
6	Bosque	17,675	BC
2	Bosque	16,9	BC
5	Bosque	14,15	BCD
6	Cultivo	14,15	BCD
1	Bosque	13,893	BCD
5	Cultivo	12,4	CD
3	Cultivo	11,863	CD
3	Bosque	7,913	DE
2	Cultivo	3,208	E

Na

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
2	Bosque	3,9575	A
4	Cultivo	3,2075	AB
4	Bosque	2,8975	AB
5	Cultivo	2,7275	ABC
3	Bosque	2,6575	ABC
6	Bosque	2,305	ABCD
3	Cultivo	2,2525	ABCD
5	Bosque	1,9525	ABCD
6	Cultivo	1,875	BCD
1	Bosque	0,715	CD
1	Cultivo	0,5725	D
2	Cultivo	0,425	D

Mg

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
1	Cultivo	120,48	A
4	Cultivo	108,14	A
1	Bosque	99,1	AB
4	Bosque	95,4	AB
3	Cultivo	95,4	AB
3	Bosque	82,24	BC
6	Bosque	64,97	CD
5	Bosque	61,68	CD
2	Bosque	55,92	CD
5	Cultivo	54,28	D
6	Cultivo	51,4	D
2	Cultivo	9,17	E

Arena

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
5	Bosque	70,683	A
6	Cultivo	67,808	AB
5	Cultivo	65,662	AB
1	Bosque	65,413	AB
2	Cultivo	62,093	ABC
6	Bosque	59,802	ABCD
4	Bosque	49,067	BCDE
3	Bosque	49,023	BCDE
4	Cultivo	46,829	CDE
1	Cultivo	40,723	DE
3	Cultivo	34,175	EF
2	Bosque	20,332	F

Arcilla

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
3	Cultivo	45,722	A
2	Bosque	41,103	AB
4	Cultivo	30,607	ABC
1	Bosque	23,172	ABC
2	Cultivo	22,8	ABC
3	Bosque	21,04	BC
1	Cultivo	20,957	BC
4	Bosque	20,88	BC
6	Bosque	18,75	BC
5	Cultivo	18,517	BC
5	Bosque	15,485	C
6	Cultivo	11,015	C

Limo

ZONAS	USOS	MEDIA	GRUPOS
2	Bosque	38,57	A
1	Cultivo	38,325	A
4	Bosque	30,053	AB
3	Bosque	29,938	AB
4	Cultivo	22,565	AB
6	Bosque	21,445	AB
6	Cultivo	21,178	AB
3	Cultivo	20,103	AB
5	Cultivo	15,822	AB
2	Cultivo	15,11	AB
5	Bosque	13,833	B
1	Bosque	11,418	B

Anexo 2. Parámetros estadísticos para las formas de Fe y Al.

Propiedad	Uso	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	C.V.	DS
Fe _t	C	7,46	54,80	31,54	38,30	51,42	16,22
	B	21,49	45,50	32,98	34,98	27,28	9,00
Fe _o	C	1,38	16,01	7,21	8,54	75,98	5,48
	B	1,69	18,03	9,56	8,99	59,54	5,69
Fe _d	C	0,30	3,20	2,05	2,35	54,44	1,11
	B	0,50	3,32	2,27	2,49	42,18	0,96
Fe _p	C	0,002	0,024	0,008	0,006	95,47	0,007
	B	0,002	0,064	0,018	0,007	132,45	0,024
Al _t	C	7,46	36,83	25,92	31,71	40,43	10,48
	B	20,48	40,41	30,01	30,94	24,27	7,28
Al _d	C	0,14	1,30	0,51	0,51	77,62	0,40
	B	0,18	1,35	0,64	0,52	65,83	0,42
Al _o	C	0,18	1,35	0,66	0,61	55,17	0,36
	B	0,56	1,79	0,92	0,74	49,86	0,46
Al _p	C	0,003	0,012	0,006	0,005	52,69	0,003
	B	0,003	0,124	0,03	0,007	182,07	0,05

Anexo 3. Relaciones Molares entre las diferentes formas de Fe y Al.

Propiedad	Uso	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	C.V.	DS
Fe _d -Fe _o	Cultivo	0,59	12,82	5,16	5,85	87,7	4,5272
	Bosque	1,2	15,53	7,29	6,59	69,4	5,062
Fe _t -Fe _d	Cultivo	5,92	38,79	24,329	27,77	45,6	11,095
	Bosque	17,55	31,98	23,427	22,26	25,3	5,9231
Fe _o /Fe _d	Cultivo	0,2	0,62	0,3529	0,31	48,4	0,1708
	Bosque	0,14	0,41	0,27	0,27	33,0	0,0892
Fe _d /Fe _t	Cultivo	0,07	0,29	0,2057	0,21	38,0	0,0781
	Bosque	0,08	0,5	0,275	0,265	49,0	0,1347
Fe _p /Fe _d	Cultivo	0,0005	0,0037	0,0014	0,0013	77,8	0,0011
	Bosque	0,0005	0,0036	0,0015	0,0013	74,4	0,0011
Fe _p /Fe _o	Cultivo	0,002	0,007	0,004	0,003	59,1	0,002
	Bosque	0,002	0,026	0,007	0,004	121,5	0,009
Al _d -Al _o	Cultivo	-0,379	-0,006	-0,1433	-0,1	93,5	0,134
	Bosque	-0,547	-0,026	-0,2793	-0,2685	72,6	0,2029
Al _o -Al _p	Cultivo	0,17	1,34	0,65	0,6	55,5	0,3606
	Bosque	0,56	1,78	0,89	0,73	50,8	0,4518
Al _p /Al _o	Cultivo	0,006	0,03	0,0107	0,008	80,2	0,008597
	Bosque	0,004	0,12	0,0267	0,0075	171,9	0,0458
Al _p /Al _d	Cultivo	0,007	0,039	0,015	0,010	73,4	0,011
	Bosque	0,009	0,142	0,034	0,015	153,9	0,053

C.V.= coeficiente de Variación; DS= Desviación estándar

Anexo 4. Correlaciones bivariadas de pearson.

Correlaciones

	Fe_t	Fe_d	Fe_o	Fe_p	Al_t	Al_d	Al_o	Al_p
Fe_t	1,00	,847**	,838**	,356**	,800**	,848**	,719**	0,14
Fe_d	,847**	1,00	,799**	,734**	,802**	,881**	,705**	,564**
Fe_o	,838**	0,799**	1,00	,349*	,690**	,755**	,604**	0,15
Fe_p	,356**	,734**	,349*	1,00	,453**	,567**	,502**	,936**
Al_t	,800**	,802**	,690**	,453**	1,00	,641**	,525**	,390**
Al_d	,848**	,881**	,755**	,567**	,641**	1,00	,903**	,290*
Al_o	,719**	,705**	,604**	,502**	,525**	,903**	1,00	0,24
Al_p	0,14	,564**	0,15	,936**	,390**	,290*	0,24	1,00
pH	-,390**	-,662**	-,523**	-,623**	-,299*	-,589**	-,315*	-,479**
Nt	,417**	,396**	,482**	,284*	0,25	,602**	,716**	0,04
Ct	,332*	,299*	,417**	0,19	0,19	,506**	,626**	-0,03
K	,572**	,316*	,414**	0,09	,458**	0,25	,304*	0,03
Na	0,10	0,13	0,10	0,13	,502**	-0,15	-0,15	,296*
Ca	,597**	0,24	,432**	-0,27	,516**	,355**	,370**	-,377**
Mg	,910**	,582**	,721**	0,02	,700**	,615**	,538**	-0,16
Arena	-,502**	-,670**	-,373**	-,558**	-,690**	-,392**	-0,16	-,560**
Arcilla	,280*	,415**	,277*	,383**	,430**	0,23	0,06	,411**
Limo	,365**	,441**	0,20	,327*	,451**	0,27	0,15	,300*
Da	0,17	-0,03	0,22	-0,09	-0,12	0,01	0,05	-0,17

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral),

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral),



Anexo 5. Parámetros estadísticos asociados a las propiedades del suelo.

PROPIEDADES	USOS	Media	Mediana	DS	Varianza	C.V.	Minimo	Máximo
pH	CULTIVO	6,90	6,75	0,93	0,86	13,48	5,30	8,70
	BOSQUE	7,13	7,00	1,07	1,14	14,99	4,80	9,50
Nt %	CULTIVO	0,15	0,15	0,05	0,00	32,95	0,08	0,28
	BOSQUE	0,19	0,19	0,09	0,01	44,12	0,07	0,35
Ct %	CULTIVO	1,64	1,50	0,62	0,39	37,84	0,82	3,37
	BOSQUE	2,32	2,24	1,29	1,66	55,60	0,59	4,87
CN	CULTIVO	10,7	10,0	1,3	1,6	11,9	9,0	13,0
	BOSQUE	11,5	12,0	2,2	4,9	19,3	7,0	16,0
MO %	CULTIVO	2,69	2,45	1,08	1,17	40,25	1,38	5,68
	BOSQUE	3,87	3,75	2,25	5,06	58,08	0,78	8,10
Fe Total ppm	CULTIVO	3,15	3,60	1,56	2,43	49,43	0,32	5,92
	BOSQUE	3,30	3,53	0,88	0,77	26,64	1,75	4,64
Al Total ppm	CULTIVO	2,59	2,86	1,04	1,09	40,24	0,35	4,04
	BOSQUE	3,00	3,09	0,77	0,59	25,68	1,39	4,42
P olsen ppm	CULTIVO	22,32	23,05	11,83	139,92	53,01	6,12	58,34
	BOSQUE	24,88	14,07	20,78	431,66	83,52	3,29	90,51
P Total ppm	CULTIVO	1456,90	825,50	2294,00	5262000	157,45	92,00	9376,00
	BOSQUE	759,25	590,50	586,39	343853	77,23	80,00	2240,00
S %	CULTIVO	0,05	0,05	0,02	0,00	49,93	0,01	0,09
	BOSQUE	0,06	0,06	0,02	0,00	35,77	0,02	0,09
K (Cmol(+)/Kg suelo)	CULTIVO	16,12	14,11	8,26	68,17	51,21	1,24	36,60
	BOSQUE	14,86	13,96	4,59	21,09	30,92	5,96	23,38
Na (Cmol(+)/Kg suelo)	CULTIVO	2,04	2,02	1,22	1,49	59,97	0,16	4,17
	BOSQUE	2,41	2,19	1,36	1,84	56,19	0,48	5,94
Ca (Cmol(+)/Kg suelo)	CULTIVO	68,93	79,15	31,83	1013,00	46,17	5,80	105,00
	BOSQUE	75,13	81,70	38,83	1507,90	51,69	19,40	146,90
Mg (Cmol(+)/Kg suelo)	CULTIVO	78,14	89,64	39,60	1567,90	50,67	1,97	134,87
	BOSQUE	76,55	82,24	19,84	393,76	25,92	42,76	105,26
Ca ⁺²	CULTIVO	8,49	9,27	2,94	8,61	34,59	3,89	11,87
	BOSQUE	11,50	11,23	3,23	10,41	28,06	7,49	15,80
Mg ⁺²	CULTIVO	3,15	3,32	1,17	1,38	37,22	1,61	5,10
	BOSQUE	5,34	4,08	2,83	8,00	52,94	3,26	10,79
K ⁺	CULTIVO	0,29	0,26	0,15	0,02	52,46	0,14	0,59
	BOSQUE	0,39	0,215	0,32	0,10	81,55	0,17	0,92
Na ⁺	CULTIVO	0,22	0,15	0,15	0,02	71,56	0,05	0,42
	BOSQUE	0,45	0,495	0,25	0,06	54,87	0,04	0,72
CIC	CULTIVO	12,51	14,8	3,76	14,10	30,01	6,40	16,00
	BOSQUE	18,10	17	5,52	30,48	30,50	12,60	28,40
Arena %	CULTIVO	52,02	50,30	13,21	174,58	25,40	27,67	73,52
	BOSQUE	52,39	57,45	19,02	361,72	36,31	13,76	85,65
Limo %	CULTIVO	22,24	21,52	10,05	101,03	45,20	2,64	50,27
	BOSQUE	24,21	23,12	14,10	198,77	58,24	1,80	57,05
Arcilla %	CULTIVO	25,75	23,26	11,81	139,37	45,85	7,65	50,26
	BOSQUE	23,41	20,99	14,55	211,60	59,10	5,49	70,15
Da gr/cc	CULTIVO	1,45	1,47	0,13	0,02	8,80	1,21	1,71
	BOSQUE	1,35	1,37	0,10	0,01	7,21	1,13	1,53
		Variación baja		Variación Media		Variación alta		

5. Bibliografía

- Acevedo, S., Cruz, M., y Cruz, E. (2002). Distribución de óxidos de hierro, Aluminio y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. p. 401-409. *Agrociencia*(36).
- Acevedo, S. Ortiz, E. Cruz, M. y Cruz, E. (2004). El papel de los óxidos de hierro en suelos. *Ensayo en Terra Latinoamericana* 22 : 485-497.
- Acevedo-Sandoval, O., Prieto-García, F. y Gordillo-Martínez, A. (2008): Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21 (3-4): 125-132.
- Bascomb, C. L. (1968). Distribution of pyrophosphate extractable iron and Organic carbon in soils of various groups. p 251-256. *Journal of Soil Science*.(19).
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. p 151-63. *European Journal of Soil Science*.(47).
- Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Blakemore, L. C., Searle, P. L., & Daly, B. K. (1981). Soil bureau laboratory methods: A methods for chemical analysis of soils.p. 44-45. *New Zealand Soil Bureau Scientific Report*(10a).
- Brady, N., & Weil, R. (2002). *The nature and properties of soils*. p. 720-725. (Vol. 13). New Jersey: Prentice-Hall.
- Bronick, C. J. y R. Lal. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124 .(1-2): 3-22.
- Ceballos, G. (1995). Vertebrate diversity, ecology, and conservation in neotropical dry forest. pp :195-222. In: *Tropical deciduous Forest Ecosystems*. Bullock, S., E., Medina, H.A., Mooney (eds). 195-222.
- Dahlgren, R. A. y F. C. Ugolini. (1991). Distribution and characterization of short range order minerals in Spodosols from the Washington Cascades. *Geoderma* 48 : 391-413.
- Duiker, S., F. Rhoton, J. Torrent, E. Neil, y N. Smeck. (2003). Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Sci Soc Amer J* 67: 606-611.
- Emerson, W. W., R. C., Foster y J.M. Oades. (1986). Organo mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes.
- Fernandez, M; Macías, F. (1987). Análisis de los procesos de alteración y neoformación en sistemas edáficos a partir de consideraciones termodinámicas de equilibrios solución-mineral. *An. Edaf. Agrobiol.*, 46: 1-25.

- García-Rodeja, E., Nóvoa, J. C., Pontevedra, X., & et al. (2007). Aluminium and iron fractionation of European volcanic soils. *Soils of Volcanic Regions in Europe 2007* p 325-351. *Springer*.
- Gensemer, R. W. y R. C. Playle. 1999. The bioavailability and toxicity of Aluminium in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29(4): 315-450.
- Heck, R. J. y A. R. Mermut. (1999). Mechanisms and rates of iron dissolution from Brazilian plinthustalfts by dilute hydrochloric and ascorbic acids. *Soil Sci.* 164(4) : 379-438.
- Holmgren, G. G. (1967). A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. p. 210-211. *Soil Science Society of American Proceedings*(31).
- Hsu, P. H., J. B. Dixon y S. B. Weed. (1989). Aluminium hydroxides and oxyhydroxides. *Minerals in Soil Enviroments*. Soil Science Society of
- Huang, P.M. (1990). Organo-alumino polymer associations and their significance in soil and eenvironmental sciences. *Soil colloids and their associations in aggregates*. De Boodt, M.F., Hayes, M.H.B. y Herbillon, A. (eds.). pp: 179-238.
- Instituto Colombiano Agropecuario-(ICA). (1992). Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación manual de asistencia técnica. 64 p.
- IGAC. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. p. 720-725.
- IGAC. (2009). *Estudio General de suelos y Zonificación de Tierras. Departamento del Magdalena, escala 1:100000*. 489p.
- Jiménez, Y., C. Martínez y N. Mancera. (2010). Características Físicas Y Químicas del Suelo en Diferentes Sistemas de Uso y Manejo en el Centroa Agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Revista Suelos Ecuatoriales*. ISSN: 0562-5351. 40(2): 176-188.
- Jones, R.C., Babcock, C.J., y Knowlton, W.B. (2000): Estimation of the total amorphous content of Hawai'i soils by the Rietveld Method. *Soil Science Society of American Journal*. 64: 1100-1108.
- Malagón Castro, D. y Marino Santana, L. (1997). Los suelos de la región del caribe Colombiano. *Revista Suelos Ecuatoriales* (27) p.15-25.
- Malagón Castro, D. (2003). *Ensayo Sobre Tipología De Suelos Colombianos; Énfasis En Génesis y Aspectos Ambientales*.
- McKeague, J. A., M. V. Cheshire, F. Andreux y J. Berthelin. (1986). Organo mineral complexes in relation to pedogenic processes.» *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. P.M. Huang y Schnitzer, M. (eds.) 17 : 549-592.

- Molles, M. (2006). *Ecología, conceptos y aplicaciones*. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana. 670 p.
- Parfitt, R. L., y Childs, C. W. (s.f.). Estimation of forms of Fe and Al: a review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mossbauer methods. p. 121-144. *Australian J Soil Research*(26).
- Paterson, E., L. Clark y A. C. Birnie. (1993). Sequential selective dissolution of iron, aluminium and silicon from soils. *Communication. Soil Science Plant Anal.* In: Periódico Oficial del Estado de Hidalgo. (2001): 24 (15-16): 2015-2023.
- Ramírez, R., C. M. Cardona y E. I. Leiva. (2009). El Hierro y la Estructura de un Andiso Bajo Labranza y Barbechos. *Suelos Ecuatoriales*. ISSN 0562-5351 39(2). pp: 157-162.
- Shoji, S., & Fujiwara, Y. (1984). Active aluminium and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: their forms, properties and significance in clay weathering. p. 216-226. *Soil Science*(137).
- Shaefer, C.E., Reschutzegger, M., Borges-Junior, M., Simas, F.N.B., y Santos, V. (1999): Extracción secuencial de aluminio en suelos del sur de Minas Gerais (Brasil). En: 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Chile. 8-12 Noviembre. p. 20.
- Schwertmann, U. y R. Taylor. (1989). *Iron oxides*. Soil Science Society of America. pp: 379-438.
- Shoji, S. y Y. Fujiwara. (1984). Active aluminium and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Science*. 137: 216-226.
- Smith, B.F.L. (1994). Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. In: *Clay Mineralogy Spectroscopic and chemical Determinative Methods*. London. pp: 333-357.
- Tan, K. H. (1994). *Environmental soil science*. Vol. 29. New York. USA: Marcel Dekker.
- Thomas, G.W. y W. L. Hargrove. (1984). *The chemistry of soil acidity. Soil acidity and liming* F. Adam (ed.). Agronomy Monograph No. 9 American Society of Agronomy. Crop Science Society of America and Soil Science Society of America.
- Tisdall, J. M. y J. M. Oades. (1982). Organic matter and waterstable aggregates in soils. *J Soil Sci*. 33 : 141-163.
- Tonneijck, F. H., B. Jansen, K. G. Nierop, J. M. Verstraten y J. Sevink. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *Eur. J. Soil Sci*. 61:392.

- Verde J.R. (2009). “Influencia de los factores de formación y uso del suelo en las propiedades ándicas, formas y mecanismos de estabilización de Carbono en suelos del noroeste de la Península Ibérica” Trabajo de Tesis Doctoral. USC. 2009.
- Vásquez, J. R., & Baena, D. (2009). Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. 103.
- Vásquez, J. R., y J. C. Menjivar. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). ACTA AGRONÓMICA- Universidad Nacional de Colombia 59(4): 449-456.
- Vera, M. , M. Sierra , M. Díez , C. Sierra y A. Martínez. (2007). Deforestation and land use effects on micromorphological and fertility changes in acidic rainforest soils in Venezuelan Andes. Soil & Tillage Research. (97): 184-194.
- Wierzchos , J., C. Ascaso y M. García. (1992). Changes In Microstructure Of Soils Following Changes In Microstructures of soils Following extraction bonded metals and organic matter. Eur J. Soil Sci. 43(3): 505-515.
- Zapata, R. (2002). Química de los procesos pedogenéticos del suelo.UNALMedellín, Colombia 88p.
- Zysset, M., P. Blaser, Luster and A. U. Gehring. (1999). Aluminium control in different horizons of a podzol. SoilSc. Soc. Am J.63: 1106-1115.
- Zhang, M, A. K. Alva Y C. Li y D. V. Calvert. 1997. Fractionation of iron, manganese, Al an P in selected sandy soils under Citrus Production. Soil Science Society of American Journal. 61(3): 794-801.



Capítulo 4

Efectos del uso de los suelos sobre las formas y contenidos de Carbono

Un aparte de este capítulo ha sido publicado en la Revista Acta Agronómica 60(4) 2011

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/28853



EFECTOS DEL USO DE LOS SUELOS SOBRE LAS FORMAS Y CONTENIDOS DE CARBONO

Resumen

Para evaluar el efecto de diferentes usos del suelo, en las diferentes formas de Carbono estudiadas, se seleccionaron seis zonas de muestreo, en suelos al norte del departamento del Magdalena (Colombia), que permiten representar los suelos de cultivos agrícolas de mayor importancia y suelos de bosques aledaños a los cultivos, localizados entre 0-1000 msnm; en cada zona se muestrearon dos sitios: cultivo y bosque respectivamente; en cada sitio se tomaron cuatro muestras compuestas. Las formas de C determinadas fueron: el Carbono total (**Ct**), el Carbono oxidable total (**Cox**), el Carbono hidrolizable con HCl 6N (**Ch**), el Carbono, ligado al material húmico (**Cp**) mediante una extracción con pirofosfato sódico, la fracción de Carbono no oxidable (**Cnox**) o C recalcitrante se calcula por la diferencia Ct-Cox; la diferencia entre Cox- Cp, corresponde a las formas no complejadas y lentamente oxidables (**Cdcox**); los contenidos de Carbono total (**cCt**) por unidad de superficie se calcularon teniendo en cuenta la Da y la profundidad de muestreo.

Se encontraron diferencias estadísticas significativas por el efecto de las zonas, encontrándose los mayores valores de Nt (0,32), Ct (3,90), Cox (3,85), Ch (2,05) y Cp (1,15) en los suelos de bosques de la zona 1, la de mayor altitud (956 msnm) y precipitación (2000 mm) y temperatura más baja (24°C) y la única en la que el balance de agua mensual señala la existencia de agua infiltrada de acuerdo a los datos climáticos descritos en los capítulos 1 y 2; en relación a los usos del suelo solo presentaron diferencias significativas: Nt, Ct, Cox y Ch en general los valores de las formas de C más estables para los suelos de bosques superaron los de los suelos de cultivos. El Cox y Cnox representaron el 95% y 5% del C total respectivamente para los diferentes usos del suelo.

La mayor acumulación de Ct se presentó en la zona 1, suelos de bosque (109 t ha⁻¹) y la menor en la zona 3 suelos de cultivo (32 t ha⁻¹) y en promedio se presentó una pérdida del 26% del Ct por efectos del cambio de usos del suelo de bosques a cultivos.

1. Introducción

El Carbono orgánico del suelo es un componente importante del ciclo global del C, ya que representa el doble de la cantidad del C atmosférico (Prentice, 2001). La sensibilidad de

la descomposición del COS y los mecanismos de metaestabilización de la materia orgánica cada vez tienen mayor importancia para los estudiosos del fenómeno de cambio climático, debido a su repercusión en el ciclo global de C y su efecto inminente en el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (Davidson y Janssens 2006, Von Lützow and Kögel-Knabner, 2009). El stock de Carbono terrestre más activo está en el suelo (Figura 1), contiene una cifra estimada de 2500 Pg de Carbono, comparado con los 620 Pg de la biota terrestre y detritos, y los 780 Pg de Carbono contenidos en la atmósfera (Lal, 2010).

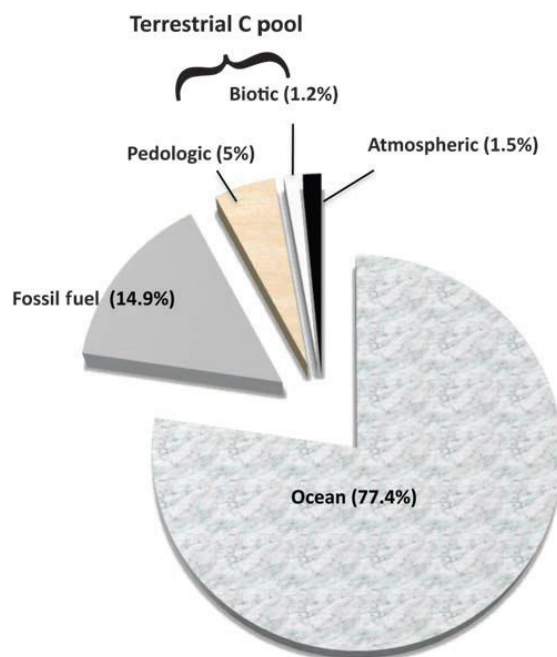


Figura 35. Compartimentos de Carbono (Contenido total 50400 Pg. C). Tomado de Lal (2010).

El progresivo aumento de la población mundial, proyectado en 9,2 billones para el año 2050, ha dado lugar a la conversión en gran escala de ecosistemas naturales al uso agrícola de la tierra, tales conversiones a gran escala de los ecosistemas naturales han dado lugar históricamente a grandes emisiones de C a la atmósfera; Ruddiman (2003) sugirió que desde los albores de la agricultura sedentaria (6000 años atrás), aproximadamente 320 Pg de C pueden haberse agotado por el efecto de los cambios de usos en los suelos. (Lal, 2010). Los suelos agrícolas contienen entre un 25 % y un 75% menos COS que sus suelos homólogos de los ecosistemas naturales; los cambios de uso del suelo, el drenaje, la labranza, quemadas no controladas, crean un efecto negativo en los contenidos de MOS, porque las pérdidas de C superan las ganancias y atenúan la tasa de mineralización de la MOS (Lal, 2004^a).

Se estima que hasta un metro de profundidad los suelos contienen unas 1500 Gt de C, de las que se considera que el 44% está en los trópicos, donde los tiempos de residencia de la

materia orgánica son menores y por lo tanto los depósitos de C son más susceptibles a los cambios producidos por las acyuaciones que se realizan sobre ellos, tales como el laboreo, fertilización, cambio de uso, etc (López-Ulloa, 2005). De ahí que las pérdidas de este elemento se suelen relacionar mayoritariamente con la conversión de ecosistemas naturales a sistemas agrícolas, tanto por la reducción en los aportes de materia orgánica (necromasa) como por la reducción en el grado de protección física del suelo (Tan y Lal, 2005).

Aproximadamente 8,7 Gt (1 Gt = 1 billón de toneladas) de carbono (C) son emitidas a la atmósfera cada año y en gran escala por la acción antropogénica (Denman *et al.*, 2007; Lal, 2008a,b). Sin embargo, el incremento en la atmósfera ha sido del orden de 3.8 Gt C año⁻¹ (tasa de incremento en el 2005, Denman *et al.*, 2007), destacando la importante capacidad reguladora de la biósfera sobre los reservorios de Carbono (Le Quéré *et al.*, 2009).

En Colombia los suelos dedicados a la agricultura convencional, contienen alrededor de 1-3% de Carbono Orgánico (COS), mientras que los suelos de pastos y suelos de bosques usualmente contienen más. (Jenkins, 1988, Guo y Gifford, 2002) resaltaron la influencia de los usos del suelo sobre los contenidos de COS, tras revisar 74 publicaciones encontraron que cambios de praderas a bosques artificiales (plantaciones forestales) que representaron pérdidas del 10% del C inicial, de bosques nativos a bosques artificiales pérdidas del 13%, de bosques nativos a cultivos pérdidas del 42% y de praderas a cultivos pérdidas del 59% en el COS.

Por el contrario al cambiar de bosques nativos a pastos observaron ganancias del 8%, de cultivos a pastos ganancias del 19%, de cultivos a bosques artificiales ganancias del 18%, y de cultivos a bosques secundarios ganancias del 53% en el COS. En conclusión se ve como el cambio del uso de suelos de cultivo a praderas o de cultivos a bosques permanentes representa un aumento significativo en los contenidos de COS; Post y Kwon (2000), estimaron que las tasas medias de acumulación de COS para pastizales y establecimiento de bosques secundarios era de 0,33 t C ha⁻¹ año⁻¹ y 0,34 t C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. La conversión de todos los usos del suelo a cultivos o monocultivos resultan casi siempre en pérdidas del COS (Stockmann *et al.*, 2013).

A pesar de varios estudios sobre los inventarios mundiales del COS, los datos cuantitativos sobre la relación entre la concentración de COS y los factores que lo controlan no son suficientemente conocidos en muchas zonas (Lal, 2004), por lo que se considera que la

escasez de datos sobre la distribución del carbono en el suelo en diferentes paisajes es una de las lagunas de conocimiento más importantes en la Ciencia del Suelo. Esto es especialmente importante en ecosistemas muy frágiles como los de las regiones semiáridas (Hoffmann et al. 2012).

La visión de la materia orgánica del suelo, como una asociación supramolecular, no covalente, de moléculas pequeñas que pueden sobrevivir un cierto tiempo a la acción de la degradación microbiana de los tejidos de plantas y animales y el reconocimiento de que esta naturaleza molecular del humus puede tener implicaciones tecnológicas en la gestión del suelo agrícola aún no se ha desarrollado suficientemente. Por ello, debemos plantearnos métodos alternativos para incrementar el secuestro de C en suelos agrícolas. Una alternativa posible sería explorar la capacidad de la materia humificada / hidrófoba, tal como compost maduro modificado, para adicionar a los suelos. Otro método podría basarse en el uso de catalizadores biomiméticos para ser extendido en los suelos y fotopolimerizar oxidativamente la MOS in situ. La formación de enlaces covalentes intermoleculares entre moléculas húmicas del suelo aumenta la energía química requerida por los microbios para mineralizar la MOS. Ambos métodos fueron verificados en su eficacia en el suelo antes de la ampliación de su uso en ensayos de campo con cultivos agrícolas reales (Píccolo, 2012).

Existen una serie de factores que influyen en el COS, como el historial de usos de la tierra, las entradas y salidas de materia orgánica del sistema y el manejo de estos usos de la tierra; factores como las condiciones físicas y biológicas del suelo y la historia de las entradas de material orgánico a los suelos pueden determinar las tasas de cambio de carbono orgánico bajo el suelo cuando la vegetación y las prácticas de manejo han cambiado, tal como en la eliminación de bosque para establecer pasturas (Post y Kwon 2000). Cuando se presenta una situación como la anterior, se puede ganar o perder carbono del suelo dependiendo de las circunstancias específicas, como el uso de fertilizantes o la eliminación de la cobertura vegetal (Post y Kwon 2000). Además, las actividades de manejo tanto para la producción animal como el aprovechamiento forestal también afectan el almacenamiento de carbono. Las similitudes estadísticas del COS entre usos del suelo se puede deber a la edad de los sistemas. El amplio rango de edad de parcelas medidas en cada sistema dificulta evaluar el efecto de los sistemas de uso del suelo en el COS (Ibrahim et al., 2007).

Diferentes autores (Lal, 2004, 2005,...) consideran que los suelos del planeta han perdido de 40 a 90 Pg C a través del cultivo y la alteración antrópica. Las tasas actuales de

pérdida de carbono debida al cambio del uso del suelo son aproximadamente $1,6 \pm 0,8 \text{ Pg C año}^{-1}$, siendo en los trópicos donde este efecto es más significativo. Teniendo en cuenta esto parece que el mecanismo más eficaz para la gestión del carbono del suelo sería detener la conversión de los suelos naturales a la utilización agrícola y silvícola, pero con una población cada vez mayor en el mundo en desarrollo y el cambio de dieta, es probable que se requieran más tierras para la agricultura y que deba maximizarse la productividad de las tierras agrícolas existentes. En estas condiciones las mejores prácticas de manejo serían las que permitieran el logro de los objetivos productivos con la disminución de la velocidad de pérdida de C, ó, mejor aún, la recuperación del estado original o el más próximo posible a él del stock de carbono del suelo. Se considera que para ello es necesario incorporar conocimientos del comportamiento edáfico del C en los sistemas de gestión agronómica y silvícola. Esto es tender a **“una agricultura y silvicultura del C”**. Sin embargo, existen muchas barreras para la implementación de mejores prácticas de manejo, el más importante de los cuales es que los países en desarrollo son impulsados por la pobreza y en algunas zonas exacerbados por una población en crecimiento. Por ello, las prácticas de manejo que mejoran rápidamente la seguridad alimentaria y la rentabilidad son las más fáciles de adoptar (Smith, 2008).

Según el Panel Intergubernamental sobre el cambio climático global (IPCC), se espera que las temperaturas aumenten $1,1$ a $6,4 \text{ °C}$ durante el siglo XXI, y patrones de precipitación serán alterados por el cambio climático. Los suelos están íntimamente vinculados a la atmósfera y al clima a través del carbono, nitrógeno y ciclos hidrológicos. El clima se modifica, por lo tanto, tiene un efecto en los procesos del suelo y sus propiedades, y al mismo tiempo, los suelos se tendrán un efecto sobre el clima. Los estudios sobre los efectos del cambio climático en los procesos del suelo y las propiedades es todavía incipiente, pero ha puesto de manifiesto que el cambio climático tendrá un impacto en la dinámica de la materia orgánica del suelo, incluyendo los organismos del suelo y en las múltiples propiedades de los suelos que se encuentran ligadas a la materia orgánica, el agua del suelo, y la erosión de los suelos (Brevick, 2012).

La mayoría de los suelos agrícolas solamente secuestran carbono entre 50 y 150 años (Mosier, 1998; Lal, 2010). El IPCC estima que $0,4$ a $0,8 \text{ Pg C años}^{-1}$ (el equivalente a $1,4$ - $2,9 \text{ Pg de CO}_2 \text{ año}^{-1}$) podría ser secuestrado en suelos agrícolas, con saturación de carbono en el suelo se producen después de 50 a 100 años (Smith *et al.*, 2007). Calcula las emisiones antropogénicas de CO_2 a la atmósfera en 2004 totalizadas en un 38 Pg C año^{-1} (IPCC,

2007b), y los sumideros de carbono naturales han tenido alrededor del 45% de las emisiones antropogénicas de CO₂ de la atmósfera desde el año 1959 (Denman *et al.*, 2007), lo que significa aproximadamente 21 Pg año⁻¹ de C antropogénico sigue siendo emitido en la atmósfera por largo tiempo en 2004. La retención del carbono en los suelos agrícolas sería capaz de reducir de 2 a 4% de las emisiones antropogénicas anuales de carbono a la atmósfera en los próximos 50 a 100 años, aunque esto no es una gran cantidad, hay otras razones para la fijación del carbono en los suelos agrícolas, que incluye la rehabilitación de los suelos degradados y el mejoramiento general de su calidad, lo cual puede llevar a un aumento de la producción de cultivos y la mejora de la seguridad alimentaria (Brevik, 2009; Lal, 2010).

Al igual que en otros elementos químicos, donde conceptos como biodisponibilidad, labilidad o especiación, entre otros, son cada vez más considerados, en el caso del C es necesario disponer de otros datos además del contenido total, pues en la mayor parte de los casos las respuestas a los problemas dependen, en mayor medida, de la especie o forma en que se encuentra el elemento. Las formas de C existentes en los suelos responden a: formas orgánicas (humus), formas inorgánicas sólidas (carbonatos), formas inorgánicas solubles (CO₂ disuelto e iones derivados según el pH, CID) y formas orgánicas solubles (COD) a las que deberían añadirse las formas gaseosas (CO₂, CO y CH₄) presentes en la atmósfera del suelo (Macías *et al.*, 2004).

Si la oxidación de la materia orgánica es una técnica que aprovecha su inestabilidad termodinámica pueden hacerse otras determinaciones de formas de C basadas en otras propiedades. Así, puede determinarse el C soluble en agua a diferentes temperaturas (Herbert y Bertsch, 1995, Ghani *et al.*, 2003); el C presente en la biomasa microbiana (Vance *et al.*, 1987); el C metabolizable a diferentes condiciones de humedad (respirometrías), que puede obtenerse con los nutrientes actualmente existentes (C metabolizable actual) o añadiendo nutrientes lábiles que incentiven el metabolismo de otras formas menos asimilables (C cometabolizable); el C hidrolizable en diferentes condiciones de pH (Parsons, 1989); el C *mineralizado* en tiempos de incubación determinados, con o sin adición de nutrientes; el C *extraíble* con diferentes agentes complejantes, como el C pirofosfato (Bascomb, 1968), que normalmente se considera equivalente al C humificado, y diferentes grados de oxidabilidad (C *oxidables*;) que pueden obtenerse mediante agentes oxidantes con diferente capacidad oxidativa (ej: tetróxido de Rutenio, Ilsley *et al.*, 1986; Griffith *et al.*, 1989; KMnO₄, diferentes concentraciones de KMnO₄, Tirol- Padre; Ladha, 2004; ..), diferentes condiciones de ataque

con $K_2Cr_2O_7$, oxidación con perboratos, persulfatos, hipoclorito, ozono, radicales OH^- , etc., de modo que se obtenga un gradiente de oxidabilidad desde los más fácilmente oxidables hasta los no oxidables (Loginow *et al.*, 1987; Blair *et al.*, 1995; Macías *et al.*, 2004).

La magnitud y velocidad de la pérdida de COS debido a las actividades agrícolas suele ser más elevada en suelos con reservas más altas, en los trópicos más que en las regiones templadas y en las tierras de cultivo más que en los pastos y terrenos arbolados. La pérdida de la reserva de COS en suelos agrícolas puede llegar hasta las 30 ó 60 $Mg\ ha^{-1}$ en función de la reserva existente, el clima, el uso del suelo y las técnicas de manejo; ésta se acentúa cuando la pérdida de C por erosión, mineralización y lavado es mayor que el aporte de C procedente de los rastrojos y la biomasa radicular en los ecosistemas manejados. Es difícil evaluar de una manera precisa la pérdida histórica de COS, pero se cree que oscila entre 66 y 90 Gt. (Lal, 2005).

Lal (2001) estima que la agricultura representa el 25% de las emisiones; esto significa que los suelos agrícolas han pasado de actuar como “**sumideros**” de C (se entiende por sumidero dentro del Protocolo de Kioto “cualquier sistema o proceso que sustrae un gas o gases de la atmósfera”) a convertirse en “**fuentes**” para la atmósfera, debido al mal uso que se está realizando de los recursos edáficos y bióticos (Macías *et al.*, 2004). Es bien conocido que la materia orgánica es termodinámicamente inestable en condiciones superficiales oxidantes, pero puede mantenerse en forma metaestable de forma duradera en ambientes pantanosos, lacustre o marinos de condiciones reductoras y en algunos suelos (Chesworth, 2002; Macías *et al.*, 2004).

Sólo una proporción limitada del total de la materia orgánica del suelo (principalmente la de origen reciente) muestra una estructura química que puede ser asimilada a la de los constituyentes macromoleculares de la biomasa (sobre todo vegetal y microbiana). Algunas de estas sustancias orgánicas (p. ej., celulosa y hemicelulosas, ligninas, cutinas y suberinas) pueden experimentar alteraciones estructurales en los suelos (diagénesis) tales como cambios en el contenido de grupos funcionales, condensación, despolimerización, o incorporación de productos derivados del metabolismo microbiano (p.ej. lípidos o proteínas). A pesar de que se considera que estos constituyentes de las plantas son rápidamente metabolizados y transformados en su mayor parte en CO_2 y H_2O (proceso de mineralización) también es posible que, sobre todo en determinados tipos de suelos en los que concurren factores ambientales o geológicos específicos, una proporción significativa de estas sustancias

permanezcan estable durante un considerable periodo de tiempo como resultado de sus interacciones con otros componentes del suelo.

Además de los anteriores constituyentes, que presentan estructura química más o menos definida, gran parte de la materia orgánica estabilizada en el suelo (fracciones particuladas o coloidales), consisten en una mezcla de sustancias macromoleculares con estructura tridimensional y caótica, diferente a la de las macromoléculas constituyentes de la biomasa. Dichas macromoléculas húmicas incluyen dominios aromáticos y alifáticos (O-alquílicos y alquílicos) así como grupos funcionales oxigenados dispuestos sobre superficies de diferente reactividad (Wershaw *et al.*, 1977). Para este tipo de sustancias no es posible actualmente establecer modelos estructurales estequiométricos (Amendros, 2004).

Los conceptos de la estructura de la MOS han cambiado de forma notoria en los últimos años. La visión histórica la define como un material parcial a altamente policondensado, amorfo, de color oscuro y de amplio rango molecular. Una percepción más actual sugiere una estructura molecular compuesta por moléculas relativamente simples, cuya composición no necesariamente determina su estabilidad, ya que la persistencia temporal de la MOS (metaestabilización) está principalmente promovida por complejas interacciones entre ésta y su entorno próximo, particularmente con los cationes metálicos existentes en la disolución del suelo y con los componentes coloidales más o menos cristalinos, además de la posible protección física que puede producirse en el interior de los agregados. La MOS es termodinámicamente inestable bajo condiciones óxicas. Su presencia en suelos está explicada por la existencia de condiciones no ideales o de cinética oxidativa y metabólica ralentizada, de tal forma que el C no es oxidado a CO₂. Estas condiciones no ideales están asociadas a la falta de energía de activación necesaria para tal reacción estando favorecidas por los diferentes mecanismos de protección de la MOS (p.ej. protección física y química) en el suelo así como por determinadas condiciones ambientales que detienen o reducen la actividad de los microorganismos que actúan como catalizadores de las reacciones de descomposición. Los principales factores implicados en la metaestabilización de la MOS en suelos son: (i) la recalcitrancia intrínseca de determinadas fracciones de la MOS (p.ej. la preservación selectiva del carbón), (ii) oclusión física dentro de agregados estables del suelo, (iii) la protección química por interacciones con superficies minerales o iones metálicos y (iv) múltiples procesos conformados por condiciones ambientales específicas.”(Suarez, 2013)

En Suramérica, para 1961 existían 418,1 millones de hectáreas de pasturas y, para el 2002, estas áreas habían aumentado a 515,9 millones. El incremento de las áreas de pasturas hace que sea urgente tomar medidas a escalas tanto locales como regionales para buscar estrategias de mitigación de los niveles de CO₂ en la atmósfera por parte de los sistemas ganaderos. Se ha estimado que el carbono (C) en la biomasa de los bosques primarios y secundarios varía entre 60 y 230 y entre 25 y 190 t ha⁻¹, respectivamente (Brown *et al.* 1997), y que el C en el suelo puede variar entre 60 y 115 t ha⁻¹. (Ibrahim *et al.*, 2007)

En Colombia se ha evaluado la capacidad de los suelos para capturar el CO₂, de acuerdo con la distribución de C en microagregados de diferente tamaño (IDEAM, CIAT e IGAC). García (2003) en su tesis sobre análisis potencial de emisión de dióxido de carbono del páramo de Chingaza considera que la MO asociada con microagregados menores de 100 µm son más estables y por consiguiente más eficientes para capturar el CO₂, durante mayor tiempo. Sin embargo, de acuerdo con Balesdent (1996) la fracción más estable de materia orgánica se encuentra asociada con los microagregados menores de 50 µm y este es el índice utilizado por funcionarios del IGAC para evaluar la capacidad de los suelos para secuestrar el CO₂. En suelos bajo bosque, de la Amazonia y el Pacífico, se presenta una cantidad importante de MO en el mantillo, pero su capacidad para secuestrar el CO₂ es baja debido al predominio de compuestos fácilmente biodegradables (necromasa fresca) y a la práctica ausencia de sustancias inorgánicas meta estabilizadoras. Algo parecido sucede con las sustancias húmicas asociadas a las arcillas de baja actividad. Los Andisoles y suelos arcillosos de la región andina tienen mayor capacidad para secuestrar MO asociada a microagregados menores de 50 µm y a partículas minerales finas pero con bajo grado de orden como alófana y otros materiales pobremente cristalinos (Correa, 2005). De igual manera Moreno y Lara (2003), investigaron el tema en la cuenca media del río Porce (NE del departamento de Antioquia) en la cordillera central colombiana, a alturas entre 925-1500 m, temperatura promedio anual de 22,7 °C y 3050 mm de precipitación, en Inceptisoles distróficos de régimen ústico (Dystrusteptes) y Entisoles (Aquents, Psamments y Orthents); el COS en bosques primarios fue superior al de los bosques secundarios (251,7 y 198,4 t C ha⁻¹ y, entre 1 y 4 metros de profundidad se cuantificaron 78,7 y 41,9 t C ha⁻¹, respectivamente).

Por lo anterior, en este trabajo se propuso en este aparte iniciar la evaluación de las variaciones en los almacenamientos de C en sus distintas formas y usos del suelo, localizados en diferentes zonas edafoclimáticas propias de los cultivos de mayor importancia económica

en el departamento del Magdalena, partiendo de la hipótesis que el CO en los suelos de esta región es afectado por los cambios en el uso del suelo, sin dejar de lado las pérdidas de C en suelos dedicados tradicionalmente a la agricultura intensiva.

2. Materiales y Métodos

2.1. Muestreo de suelos

Acorde a lo descrito en el capítulo 2 en relación al muestreo y a la descripción edafoclimática de las zonas.

2.2. Métodos Analíticos

Análisis físicos: Se determinó el **color** de los suelos en húmedo, mediante la tabla Munsell. La densidad aparente (D_a), se determinó por dos métodos, el del cilindro graduado y el del terrón parafinado (IGAC, 2006), la **textura** de los suelos por el método del hidrómetro de Bouyoucos.

Análisis químicos: Se determinó el pH en H_2O , en una relación 1:2.5 (IGAC, 2006), el N total (Nt) se determinó mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI); Los contenidos de Ca, Mg, Na y K, totales, fueron extraídos por digestión ácida y determinados por espectrofotometría de absorción atómica.

Análisis del Carbono: Esencialmente se siguió la metodología utilizada por Macías et al (2004) para el establecimiento de las formas de C en suelos de Galicia que, entre otras, realiza las siguientes determinaciones: *Carbono total* (**Ct**) se determinó mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI), *Carbono oxidable total* (**Cox**) mediante la técnica Walkley y Black (1934) en caliente ($105\text{ }^\circ\text{C}$), citado por IGAC (2006), *Carbono hidrolizable* con HCl 6N (**Ch**) descrito por Tan *et al.* (2004), *Carbono humificado*, ligado al material húmico (**C_p**, **Al_p** y **Fe_p**) mediante una extracción con pirofosfato sódico Velasco (2006), determinándose los elementos metálicos por absorción atómica y el Carbono digerido en solución ácida con dicromato potásico y cuantificado por valoración, y la fracción de *Carbono no oxidable* (**Cnox**) calculada por la diferencia Ct-Cox; la diferencia entre Cox- C_p, corresponde a las formas no complejadas y lentamente oxidables (Cdox); los contenidos de Carbono total (**cCt**) por unidad de área se calcularon de la siguiente manera: $\text{kg Ct m}^{-2} = \text{Ct en g kg}^{-1} * D_a \text{ en g cm}^{-3} * \text{prof de muestreo en m}$.

Análisis de la información: Para cada una de las propiedades (físicas y químicas) evaluadas se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación en relación al uso del suelo. Se realizó un ANOVA multivariado, con el objeto de establecer diferencias estadísticamente significativas, entre zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción.

Se realizó un análisis de componentes principales para reducir la dimensión de los datos, agrupando variables y facilitando la explicación de la variabilidad total con los dos primeros componentes extraídos. Utilizando como variable de agrupación usos del suelo, se realizó un análisis discriminante para buscar diferencias entre grupos y determinar las variables con mayor peso en cada grupo o uso del suelo. (Programa SPSS versión 15).

3. Resultados y discusión

3.1. Características físicas y químicas de los suelos estudiados

En la Tabla 1Tabla 51, se incluyen los resultados de las determinaciones físicas y químicas de los suelos estudiados. Se presentó un rango de color en húmedo entre 2,5YR 3/2 a 10 YR 3/2, correspondiente a colores rojo-amarillentos oscuros, típicos de los horizontes superficiales influenciados por la presencia de pequeñas cantidades de materia orgánica; en relación a la textura no se observa mucha variabilidad entre suelos de cultivo y suelos de bosques siendo la fracción arena la de mayor porcentaje repercutiendo en las clases texturales, con predominio de la clase Franco arcillo arenosa tanto en suelos de cultivos como de bosque. Los valores de densidad aparente determinados por el método del terrón parafinado (IGAC 2006) en promedio pueden considerarse de normales a ligeramente altos para suelos de textura media (Malagón, 1985), no obstante los mayores valores se presentan en suelos de cultivo expresando el efecto del laboreo de los suelos en el aumento de su densidad aparente, considerándose una propiedad sensible al cambio de uso.

Se presentan valores medios de pH de 6,9 para cultivos y valores de 7,1 para bosques, siendo la zona 1 la que presenta valores de pH más bajos 5,6 y 6,5 respectivamente, marcados por la diferencia de altitud, pluviosidad y topografía del terreno, acorde a lo descrito por Rubiano *et al.* (1995) y el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena-IGAC (2009) para los suelos de montaña en clima cálido ubicados en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta; en contraste con la zona 6

con pH medios para suelos de cultivos de 8,6 y de 8,7 para suelos de bosques, en la cual es evidente que la evapotranspiración excede notablemente la pluviosidad media anual (Vásquez y Baena, 2009), lo que se corrobora con una alta saturación de bases en el complejo de cambio de los suelos estudiados, siendo el Calcio el catión dominante y que condiciona muchos procesos fisicoquímicos en estos suelos. Entre zonas se presentaron diferencias estadísticas significativas a excepción de los contenidos de limo, destacando el efecto marcado de las condiciones edafoclimáticas propias de cada zona sobre las propiedades del suelo, en relación a la variable de agrupación usos del suelo presentaron diferencias significativas las propiedades: pH, Fe_p , Al_p , Na, Ca total, y Da, evidenciando el efecto de las labores de cultivo sobre la dinámica de éstas propiedades en los suelos estudiados (Jimenez et al., 2010).

3.2. Análisis de las formas y contenidos de Carbono

En las Tablas 3, 4 y 5 se indican algunas características edafoclimáticas que pueden ser relevantes para la interpretación de los resultados de las formas de C para las diferentes zonas. La concentración de C total es baja; sólo el suelo con vegetación de bosque húmedo de la zona 1 y el del bosque seco zona 3 superan el 3% de C que se considera es el mínimo para disponer de una buena estabilidad estructural en la Estrategia Europea de Protección del Suelo. Todos los demás valores son inferiores, dominando el intervalo entre 1 y 2%. Es cierto que si se consideran estos valores dentro del contexto de los suelos colombianos no son excesivamente bajos, pero sí ponen de manifiesto los problemas que pueden aparecer asociados a los bajos porcentajes de C y, también la escasa relevancia de los sistemas (incluso naturales) como sumidero de C. A título comparativo, el sumidero de los suelos del departamento del Magdalena representa para suelos con vegetación natural cifras que van de 40 a 109 kg C ha⁻¹ y de 32 a 78 kg C ha⁻¹ en los suelos cultivados, mientras que en Galicia la media de los suelos es del orden de las 200 t C ha⁻¹ y los suelos de cultivo presentan valores en el entorno de los 40-70 t C ha⁻¹. Es decir, factores que reducen por 1000 el sumidero respecto a los suelos de Galicia que se explican por las grandes diferencias que hay en los factores climáticos y en los mecanismos de estabilización edáfica.

Tabla 51. Propiedades físicas y químicas de los suelos

Propiedades	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
CULTIVO							
pH	5,6	6,3	6,5	7,1	7,1	8,6	6,86
Fe_p (ppm)	23,63	5,75	5,03	6,26	3,78	1,88	7,72
Al_p (ppm)	11,75	5,33	5,00	4,78	3,83	3,13	5,63
K (cmol(+)kg⁻¹suelo)	20,86	3,21	11,86	25,19	12,40	14,15	14,61
Na (cmol(+)kg⁻¹suelo)	0,57	0,43	2,25	3,21	2,73	1,88	1,84
Ca (cmol(+)kg⁻¹suelo)	75,68	11,50	99,25	93,89	49,50	58,83	64,77
Mg (cmol(+)kg⁻¹suelo)	120,48	9,17	95,40	108,14	54,28	51,40	73,14
Arena %	40,72	62,09	34,18	46,83	65,66	67,81	52,88
Arcilla %	20,96	22,80	45,72	30,61	18,52	11,02	24,94
Limo %	38,33	15,11	20,10	22,57	15,82	21,18	22,18
Da (g cm⁻³)	1,50	1,40	1,25	1,57	1,43	1,45	1,43
BOSQUE							
pH	6,5	5,6	7,0	7,8	7,1	8,7	7,13
Fe_p (ppm)	23,63	64,05	6,10	4,88	7,13	2,23	18,00
Al_p (ppm)	12,05	124,25	7,65	4,55	6,15	2,75	26,23
K (cmol(+)kg⁻¹suelo)	13,89	16,90	7,91	18,60	14,15	17,68	14,85
Na (cmol(+)kg⁻¹suelo)	0,72	3,96	2,66	2,90	1,95	2,31	2,41
Ca (cmol(+)kg⁻¹suelo)	107,60	23,00	101,33	101,73	46,93	70,20	75,13
Mg (cmol(+)kg⁻¹suelo)	99,10	55,92	82,24	95,40	61,68	64,97	76,55
Arena %	65,41	20,33	49,02	49,07	70,68	59,80	52,39
Arcilla %	23,17	41,10	21,04	20,88	15,49	18,75	23,41
Limo %	11,42	38,57	29,94	30,05	13,83	21,45	24,21
Da (g cm⁻³)	1,40	1,33	1,19	1,46	1,35	1,36	1,35

Los suelos con vegetación natural contienen claramente más C que los suelos cultivados del mismo sitio, representando las diferencias o pérdidas que oscilan entre el 18 y el 60% del C total inicial del suelo natural, con máximos en los suelos transformados para el cultivo de frutales, probablemente por la mayor intensidad del laboreo realizado para la plantación. Sólo el cultivo de banano y mango del sitio 4 supone un incremento del contenido de C respecto al suelo natural. Si los cálculos del balance de pérdidas se efectúan sobre el contenido global de C por unidad de superficie en los 20 cm superficiales, las pérdidas parecen menores pues representan cifras entre 6 y 50% del contenido inicial, con los valores máximos de pérdida en la transformación a frutales (50%) y a cafetales (31%) y, de nuevo, con el incremento en el cultivo del banano y mango del sitio 4, que debe explicarse por la gran cantidad de aportes orgánicos que se realiza en estos cultivos. Sin duda, estos resultados pueden y deben ser tenidos en cuenta en la gestión agronómica. En sentido positivo estos

datos ponen de manifiesto que las adiciones fuertes de residuos verdes en los suelos cultivados permiten mantener e incluso aumentar ligeramente el sumidero de C en estas condiciones semiáridas; luego, las pérdidas no son obligadas y es posible mantener los niveles naturales. En sentido negativo también ponen de manifiesto que determinadas actuaciones, como las que se han llevado a cabo en la transformación en cultivo de frutales (sitio 5) pueden reducir drásticamente (50-60%) el contenido de C de los horizontes superficiales. Un estudio más específico de la historia de cultivo de este sitio permitirá elaborar recomendaciones de actuación que impidan esta situación degradativa.

Respecto a las formas de C, se observa que en estos suelos apenas hay C recalcitrante; en los suelos naturales el porcentaje de esta forma de C de elevada persistencia (equivalente al black carbon) representa cifras de 1 a 7% con máximo en el bosque seco del sitio 4, mientras que en los suelos cultivados representa del 1 al 11 %, con máximo en el cultivo de banano del sitio 3. Es bien conocido, que en la mayor parte de los suelos el C recalcitrante suele formarse a través de los incendios de alta intensidad, por medio de las transformaciones pirolíticas que incrementan la concentración de moléculas aromáticas, si bien otros procesos pueden estar implicados. El bajo porcentaje de esta fracción tiene consecuencias importantes, pues los C recalcitrantes son relativamente inertes frente al metabolismo y la oxidación, pero ejercen importantes actuaciones físico-químicas dentro del suelo por su capacidad de retención de agua, iones, nutrientes, contaminantes, su integración con la actividad biótica y la formación de agregados estables. Todos ellos aspectos muy importantes, especialmente los ligados a la disponibilidad de agua, en climas semiáridos, es en gran parte lo que nos lleva a concluir que una actuación interesante sería la de comprobar los efectos que la adición de estos materiales, en forma de biocarbones produciría en las cualidades de los suelos y en su capacidad productiva.

El C oxidable es la fracción que representa más del 90% del C total. Es cierto que el método de oxidación utilizado es el más drástico en capacidad oxidativa ($K_2Cr_2O_7$ en medio ácido y caliente, con un $Eh > 1000$ mvol) y que estas condiciones no se pueden producir en los suelos por lo que realmente este elevado porcentaje no refleja adecuadamente el comportamiento de la materia orgánica de los suelos frente a los procesos oxidativos y metabólicos que se producen en ellos. Aún así, se pone de manifiesto que el método oxidativo proporciona un valor bastante útil para la estimación del C total y que en condiciones drásticas prácticamente toda la materia orgánica podría ser oxidada o metabolizada.

Mayor información suministra el C hidrolizable en medio ácido que representa cifras en el entorno del 50% del C total en ambos tipos de usos (47-57% en suelos naturales y 48-62% en los cultivados). Esta forma representa el C hidrolizable de carbohidratos y proteínas fundamentalmente, es decir, las formas orgánicas más abundantes en la necromasa fresca que son rápidamente metabolizables, lo que deja del orden de un 40% como estimación de las formas más difícilmente metabolizables y oxidables.

Finalmente, el porcentaje de C extraíble con pirofosfato, lo que se suele identificar con el C humificado existente, oscila entre el 19 y el 31% del Ct en los suelos con vegetación natural y es mucho más variable en los cultivados (14-71%), siendo mínimo en el cultivo de frutales y máximo en el de palma, lo que debe relacionarse con las diferencias de aporte y humificación existentes entre estos sistemas.

A excepción del Cnox y la relación C/N, las demás formas de C estudiadas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre zonas, encontrándose los mayores valores de Nt (0,32), Ct (3,90), Cox (3,85), Ch (2,05) y Cp (1,15) en los suelos de bosques de la zona 1, donde las condiciones edafoclimáticas favorecen los procesos de humificación de la MO, (Vásquez y Macías, 2011). En relación a los usos del suelo solo presentaron diferencias significativas: Nt, Ct, Cox y Ch (Anexo 2) y en general los valores de las formas de C para los suelos de bosques superaron los de los suelos de cultivos, en contraste con los datos de la zona 4, en donde los porcentajes de Ct, Cox, Ch y Cp de los suelos de cultivos superan a los obtenidos en los suelos de bosques, esto posiblemente se debe al manejo agronómico del cultivo de banano que implica un gran aporte de material vegetal del mismo cultivo y para el caso del cultivo de mango la gran cantidad de hojarasca depositada en la superficie del suelo y que afecta notablemente la dinámica de descomposición de la MO propia de estos suelos, no obstante los valores de Cnox para esta zona se mantienen mayores para los suelos de bosques comprobando la efectividad de estos suelos para la captura de C y el consecuente deterioro de la misma por el cambio en el uso del suelo.(Tabla 2)

Estos resultados corroboran algunos estudios en Colombia tales como Moreno y Lara (2003) quienes trabajando en Inceptisoles y Entisoles del departamento de Antioquia, encontraron que el C.O en suelos de bosques primarios fue superior al de suelos de áreas

intervenidas y de bosques secundarios; no obstante, en los estudios realizados por Carvajal *et al.* (2009) trabajando en suelos de diferentes usos en paisajes andinos colombianos muestra una tendencia diferente al encontrar que para muchos perfiles (0-30cm), los suelos presentaron ganancias en el almacenamiento de Carbono cuando las coberturas vegetales naturales (relictos de selva), se transformaron en cultivos, principalmente de café y plátano, mientras que se notaron disminuciones considerables cuando los cultivos se convirtieron en pastizales. Se presentan valores bajos generalizados de Cp, lo que insinúa poca formación de complejos orgánicos, probablemente por el predominio de humus joven con baja capacidad para la formación de complejos (Shoji y Fujiwara, 1984).

Tabla 52. Valores medios para las formas de Carbono en las diferentes zonas.

Propiedades	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
CULTIVO							
pH	5,6	6,3	6,5	7,1	7,1	8,6	6,86
Nt %	0,23	0,12	0,13	0,17	0,13	0,12	0,15
Ct %	2,61	1,34	1,29	1,84	1,28	1,28	1,61
Ch %	1,43	0,79	0,66	0,88	0,74	0,79	0,88
Cp %	0,81	1,00	0,59	0,53	0,18	0,45	0,59
Cnox	0,05	0,04	0,14	0,10	0,06	0,02	0,06
Cox %	2,57	1,31	1,15	1,74	1,23	1,26	1,54
C/N	11,5	11,3	9,8	10,9	10,3	10,5	10,69
BOSQUE							
pH	6,5	5,6	7,0	7,8	7,1	8,7	7,13
Nt %	0,32	0,17	0,14	0,15	0,25	0,15	0,19
Ct %	3,90	1,64	1,72	1,76	3,26	1,62	2,32
Ch %	2,05	0,93	0,88	0,82	1,81	0,87	1,23
Cp %	1,15	0,63	0,67	0,34	0,78	0,49	0,68
Cnox	0,05	0,02	0,09	0,13	0,04	0,10	0,07
Cox %	3,85	1,62	1,64	1,63	3,22	1,52	2,25
C/N	12,5	9,8	11,8	12,0	12,5	10,3	11,46

La relación C/N presentó valores entre 9,8 correspondiente a la zona 3, uso cultivo y de 12,5 en la zona 1, suelo de bosques, valores que bajo las condiciones del clima cálido tropical hacen prevalecer los procesos de mineralización frente a los de humificación de la MOS (Vásquez *et al.*, 2009).

El análisis de correlación entre las propiedades físico-químicas de los suelos y las formas de Carbono mostró una correlación significativa positiva entre los contenidos de Calcio total y las diferentes formas de C, especialmente con Ct, Cox y Ch, lo que demuestra la importancia de este elemento en la permanencia de los contenidos de Carbono en estos suelos dejando de manifiesto su capacidad flocculante; de igual manera los contenidos de Nt se relacionan positivamente y en alto grado con las diferentes formas de C evidenciando una alta relación con compuestos nitrogenados, especialmente con el Ch (0,94) que en gran parte representa el C asociado a proteínas, acorde a lo descrito por Lützow *et al.* (2007); en contraste observamos como el Na total se correlaciona significativamente pero con signo negativo, lo que explica que altos contenidos de sodio tienden a dispersar la MO y a dificultar la producción de bio y necromasa; de igual manera altos valores de pH se relacionan con bajos valores en las diferentes formas de C. (Anexo 1)

En cuanto a la relación de las diferentes formas de C estudiadas con respecto al Ct, (Tabla 6) vemos como el Cox tanto para suelos de bosque como para cultivos representa un 95% del Ct y solo un 5% lo constituye la forma Cnox o Carbono con una relativa estabilidad que garantiza considerables tiempos de residencia en los suelos, siendo aproximados al 10% en las zonas: 3 suelo arado, 5 cultivo frutales y 6 bosque muy seco tropical; ante la escasa importancia cuantitativa de esta fracción y dada su relevancia en procesos como la retención de agua y contaminantes, la capacidad de cambio y la formación de agregados estables de elevada resistencia a la erosión se incrementa la necesidad de emprender acciones para protegerla o adicionarla.

Tabla 53. Características edafoclimáticas de las zonas.

Zona	Altitud (m)	T ^a (°C)	P (mm)	ETP (mm)	Clasificación (Soil Taxonomy, 2010)	Clasificación (WRB, 2006)	Régimen hídrico	Régimen de temperatura
1	956	24	2000	990	Typic Eutrudept	Cambisol háplico	Udico	Isohipertérmico
2	42	28,4	1200	1690	Typic Ustifluvent	Fluvisol háplico	Ustico	Isohipertérmico
3	5	27	1245	1739	Fluventic Haplustept	Cambisol fluvéntico endogleyico	Ustico	Isohipertérmico
4	15	27	750	1890	Typic Haplustept	Cambisol fluvéntico endogleyico	Ustico	Isohipertérmico
5	10	30	880	1910	Fluventic Haplustept	Cambisol fluvéntico endogleyico	Ustico	Isohipertérmico
6	7	28	663	1986	Typic Ustipsamment	Arenosol háplico	Ustico	Isohipertérmico

Tabla 54. Formas de Carbono en suelos de bosques.

Zona	Vegetación natural	% Ct	% Cnox	% Cnox/Ct	% Cox	% Cox/Ct	% Ch	% Ch/Ct	% Cp	% Cp/Ct	Kg C ha ⁻¹
1	Bosque húmedo	3,9	0,05	1.3	3,85	98,7	2,05	52,6	1,15	29,5	109
2	Bosque seco	1,64	0,02	1.2	1,62	97,8	0,93	56,7	0,63	38,4	44
3	Bosque seco	1,72	0,09	5.2	1,64	95,3	0,88	51,1	0,67	39	40
4	Bosque seco	1,76	0,13	7.4	1,63	92,6	0,82	46,6	0,34	19,3	51
5	Bosque seco	3,26	0,04	1.2	3,28	98,8	1,81	55,5	0,78	23,9	87
6	Bosque muy seco	1,62	0,1	6.2	1,52	93,8	0,87	53,4	0,49	30,2	44

Tabla 55. Formas de Carbono en suelos de cultivo.

Zona	Cultivo	% Ct	% Cnox	% Cnox/Ct	% Cox	% Cox/Ct	% Ch	% Ch/Ct	% Cp	% Cp/Ct	% Pérdida C	Kg C ha ⁻¹	Pérdida total kg ha ⁻¹ Ct
1	Café	2,61	0,05	1,9	2,57	98,5	1,43	54,8	0,81	31	-33,1	78	31 (28,4%)
2	Palma	1,34	0,04	3	1,31	97,8	0,79	51	1	74,6	-18,3	38	6 (13,6%)
3	Suelo preparado para siembra de banano	1,29	0,14	11	1,15	89,1	0,66	51	0,59	45,7	-25	32	8 (20%)
4	Banano/mango	1,84	0,1	5,4	1,74	94,6	0,88	47,8	0,53	28,8	4,5	58	+7 (+18%)
5	Frutales	1,28	0,06	4,7	1,23	96,1	0,74	57,8	0,18	14,1	-60,7	37	50 (57%)
6	Hortalizas	1,28	0,02	1,6	1,26	98,4	0,79	61,7	0,45	35,2	-21	37	10 (22,7%)



El Carbono hidrolizable en HCl 6N, (remueve eficientemente el C asociado a carbohidratos, proteínas, hemicelulosa y a complejos órgano-minerales), representó el 60% del Cox en suelos de cultivo y el 57% en suelos de bosques, estando en el rango descrito por Stevenson (1994) Paul *et al.*, (1997) y Paul *et al.*,(2006) , quienes afirmaron que el Carbono hidrolizable con HCL 6N representa entre el 30-87% del Carbono orgánico del suelo; teniendo en cuenta las formas de C representadas por el Ch y los porcentajes citados anteriormente, tanto para suelos de cultivo como para bosques, podemos afirmar que los suelos de bosques poseen un mayor porcentaje de C asociado a formas de menor labilidad, probablemente porque estén presentes mayores cantidades de formas biológicamente más estables, tales como materiales con grupos alquilos, arilos, lignina y celulosa cristalina (Goering y Van Soest, 1970; Martel y Paul, 1974; Scarpenseel y Schiffman, 1977; Trumbore *et al.*,1989, Leavitt *et al.*, 1996; Lützów *et al.*, 2007).

Tabla 56. Relaciones entre contenidos y las diferentes formas de Carbono

Relaciones	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
CULTIVO							
Cox/Ct	0,983	0,977	0,895	0,943	0,909	0,985	0,95
Cnox/Ct	0,017	0,022	0,105	0,057	0,091	0,015	0,05
Ch/Ct	0,556	0,608	0,514	0,475	0,569	0,630	0,56
Cp/Ct	0,307	0,771	0,464	0,292	0,131	0,372	0,39
Cdox/Cox	0,687	0,233	0,487	0,696	0,853	0,642	0,60
Ch/Cox	0,565	0,622	0,595	0,505	0,645	0,641	0,60
Cp/Cox	0,313	0,767	0,513	0,304	0,147	0,358	0,40
BOSQUE							
Cox/Ct	0,987	0,987	0,908	0,936	0,968	0,903	0,95
Cnox/Ct	0,012	0,013	0,092	0,064	0,032	0,097	0,05
Ch/Ct	0,537	0,573	0,548	0,488	0,567	0,513	0,54
Cp/Ct	0,321	0,405	0,479	0,196	0,300	0,366	0,34
Cdox/Cox	0,701	0,609	0,594	0,790	0,757	0,680	0,69
Ch/Cox	0,543	0,582	0,617	0,523	0,589	0,583	0,57
Cp/Cox	0,299	0,391	0,406	0,210	0,243	0,320	0,31

El Carbono ligado a la fracción húmica y a formas muy lábiles Cp, representó el 41% del Cox en suelos de cultivo y el 31% en suelos de bosques; si analizamos la fracción de C oxidable no extraíble con pirofosfato (Cox-Cp), debe atribuirse a las fracciones que ya han escapado a la actividad biológica, e incluso a los procesos oxidativos normalmente existente en los suelos, en donde su potencial redox (Eh: 300-500 mvol, en suelos bien drenados) es

muy inferior al existente en condiciones del método utilizado para extraer la fracción Cox (Eh: > 1000 mvol.) Macías *et al.*, (2004). Encontramos entonces un mayor porcentaje de C asociado a fracciones más estable en suelos de bosques (69%), frente a un (59%) en suelos cultivados, siendo la zona 2 cultivo de Palma con un 77% del Cox representado por el Carbono extraíble con pirofosfato quien presenta los suelos con mayores contenidos de fracciones de C lábiles; quedando demostrado el efecto del uso y manejo de los suelos de este cultivo en detrimento de los contenidos de las formas más estables de C.

3.3. Acumulación de Carbono.

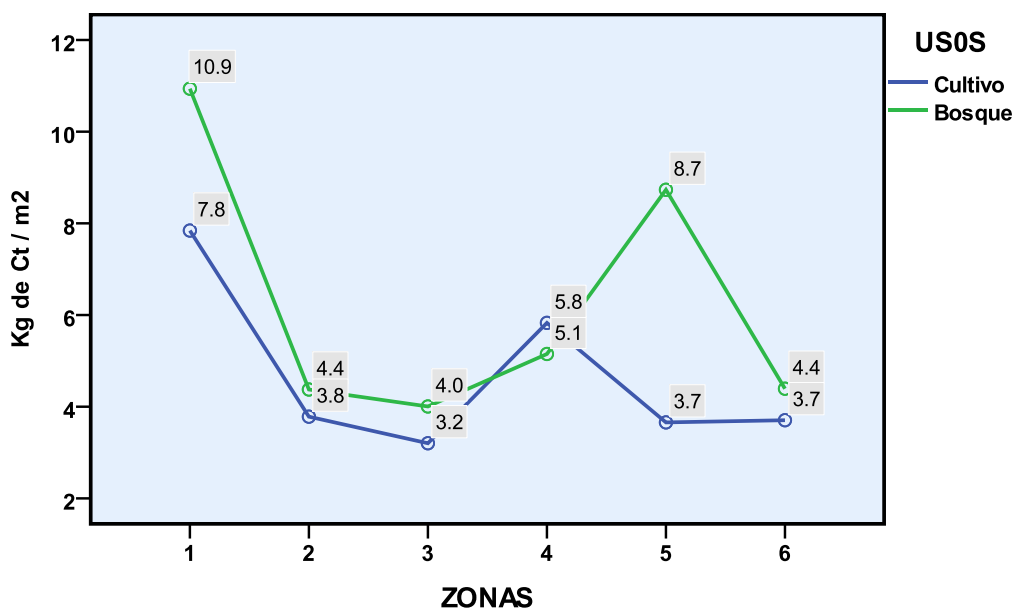


Figura 36. Almacenamiento de Ct por usos del suelo en las diferentes zonas.

En la Figura 2, se muestra el comportamiento de los diferentes contenidos de Ct a 20 cm de profundidad en las diferentes zonas, teniendo en cuenta los usos del suelo; el contenido de Ct muestra una clara relación con el tipo de uso dado al suelo y se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas entre zonas de muestreo.

En general la acumulación media de las formas de C estudiadas fue mayor en los suelos de bosques que en suelos de cultivo (Tabla 7Tabla 57); éstos resultados corroboran algunos estudios en Colombia tales como: Moreno y Lara (2003) quienes trabajando en Inceptisoles y Entisoles del departamento de Antioquia, encontraron que el CO en suelos de bosques primarios fue superior al de suelos de áreas intervenidas y de bosques secundarios, de igual manera acorde a lo descrito por Vásquez y Macías (2011), en contraste con la zona 4 donde los valores de Ct, Cox y Cp fueron mayores en los suelos de cultivo, debido

posiblemente al gran retorno de material vegetal al suelo en el manejo agronómico del cultivo de banano, acorde a lo descrito por Ridley *et al.* (1990), quienes trabajando en suelos de Australia encontraron un 150% más de C en suelos de cultivo respecto a suelos nativos; éstas situaciones aparentemente anómalas, en las que el sistema más intensificado agronómicamente contiene más C, pueden producirse por causas específicas del manejo que incrementan el retorno de mayores cantidades de biomasa y necromasa al suelo, bien por un aporte externo, bien por un incremento de la producción asociado a la mejora producida por enmiendas y fertilizantes. Es el caso de las observaciones de Ismail *et al.* (1994), citados por Macías (2004), que encontraron que niveles de C en praderas de suelos naturales fueron superados por los de cultivo en la zona; en el mismo sentido Mosquera *et al.* (2012) trabajando en suelos de la Amazonía colombiana encontraron almacenamientos de C mayores en suelos de pradera que en suelos forestales nativos.

Ismail *et al.* (1994), encontraron que niveles de C en praderas de suelos naturales fueron superados por los de cultivo en la zona; en el mismo sentido Mosquera *et al.* (2012) trabajando en suelos de la Amazonía colombiana encontraron almacenamientos de C mayores en suelos de pradera que en suelos forestales nativos. No obstante en nuestro caso las formas de C más estables como C_{nox} y C_{dox} (C_{ox-Cp}) fueron siempre mayores en suelos de bosques, reiterando la mayor capacidad natural de los suelos de bosques para capturar y estabilizar más C (Macías *et al.*, 2004).

La acumulación en $t\ C\ ha^{-1}$ a 20 cm de profundidad para las diferentes formas de C, estuvo distribuida de la siguiente manera: C_t para suelos cultivados osciló entre 32,1 (zona 3) y 78,1 (zona 1), y para bosques entre 40,9 (zona 3) y 109,1 (zona 1); el C_{ox} entre 28,7 zona 3 y 76,8 zona 1 en suelos de cultivo y entre 39 zona 3 y 107,6 zona 1 para bosques; el C_h osciló entre 16,5 (zona 3) y 42,8 (zona 1) para suelos de cultivo y entre (20,9) zona 3 y 57,4 (zona 1) para suelos de bosques; la acumulación de C_p estuvo entre 5,1 (zona 5) y 28,1 (zona 2) suelos cultivados y entre 10 (zona 4) y 32,2 (zona 1) para suelos de bosques; el C_{dox} entre 8,5 zona 2 y 52,7 zona 1 en suelos cultivados y entre 23,1 zona 3 y 75,5 zona 1 para suelos de bosques y el C_{nox} entre 0,5 zona 6 y 3,4 zona 3 suelos cultivados y entre 0,5 zona 2 y 3,6 zona 4 para bosques. (Tabla 7).

En consideración a lo anterior vemos como las condiciones climáticas de la zona 1, en particular las diferencias climáticas derivadas de la mayor altitud sobre el nivel del mar con

relación a las demás zonas de muestreo, que causan un incremento de la pluviometría (2000 mm frente a valores entre 663 y 1245 mm) y un descenso de la temperatura (24°C frente a valores entre 27 y 30°C) y de la ETP frente a los otros sitios condiciona la mayor acumulación de Carbono, acorde a lo descrito por Malagón *et al.* (2003) y en concordancia con lo expuesto por Carvajal *et al.* (2009). La mayor acumulación de la forma de C ligada a la fracción húmica (Cp) estuvo asociada a la zona 2, cultivo de Palma Africana influenciado seguramente por el manejo orgánico asociado al cultivo, con un alta adición de formas lábiles de C, pero a su vez este cultivo presentó la menor capacidad para capturar C recalcitrante expresado por la baja acumulación de la forma Cnox.

Tabla 57. Acumulación de C en los primeros 20cm de profundidad en t C ha⁻¹.

Formas de C	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
CULTIVO							
Ct	78,1	37,6	32,1	58,0	36,6	36,9	46,6
Ch	42,8	22,2	16,5	27,6	21,0	22,8	25,5
Cp	24,1	28,1	14,7	16,7	5,1	13,0	16,9
Cnox	1,3	1,0	3,4	3,1	1,6	0,5	1,8
Cdox	52,7	8,5	14,0	38,2	29,8	23,4	27,8
Cox	76,8	36,6	28,7	54,8	35,0	36,4	44,7
BOSQUE							
Ct	109,1	43,7	40,9	51,1	88,1	43,8	62,8
Ch	57,4	24,8	20,9	23,9	48,8	23,5	33,2
Cp	32,2	16,9	15,8	10,0	21,1	13,2	18,2
Cnox	1,5	0,5	2,0	3,6	1,1	2,6	1,9
Cdox	75,5	26,3	23,1	37,5	65,9	28,0	42,7
Cox	107,6	43,2	39,0	47,5	87,0	41,2	60,9

El análisis interior de cada zona permitió establecer las pérdidas de Ct en relación al cambio de uso del suelo (Tabla 8 y Tabla 9), tomando como referencia el Carbono almacenado en los suelos de bosques. Siguiendo a Six *et al.* (2002), que introdujeron el concepto de “ saturación de C”, considerando que los niveles naturales de C de los suelos reflejan el balance de ganancias y pérdidas de C teniendo en cuenta factores como la productividad y/o los regímenes de humedad y temperatura, pero no necesariamente representando el límite superior de de la capacidad de almacenamiento de C del suelo; esto significa que **“muchos suelos, si no todos, podrían almacenar más Carbono en forma metaestable del que tienen en condiciones naturales”**. Es así como para las formas Ct y Cox se perdió aproximadamente una media de 16 t C ha⁻¹ que representa una pérdida del 26%;

una pérdida media de 7,7 t C ha⁻¹ de Ch que obedece a un 23,3%, acorde a lo descrito por Calvo de Anta (1992) en un estudio realizado en suelos de la provincia de Coruña (España) donde se comprobó que los suelos de cultivos tenían pérdidas de C en relación a los suelos de bosque que oscilan entre el 26 y el 49%, siendo máximas en los suelos sobre esquistos y anfibolitas y menores en los de gabros; 1,2 t C ha⁻¹ de Cp equivalentes al 6,8%; pérdidas de Cnox de 0,1 2 t C ha⁻¹ equivalentes al 4% y en relación a la fracción Cdox pérdidas de 15 t C ha⁻¹ representadas en un 35%. Relacionando las pérdidas de C con los suelos de cultivos se observó que el suelo sembrado con Café presentó pérdidas del 28,4% de Ct acorde a lo descrito por Hoyos *et al.* (2005), el cultivo de la Palma africana indujo pérdidas del 15,27%, mientras que los cultivos de Banano y Mango experimentaron ganancias del 15% aproximadamente para Ct, Cox, y Ch y del 67% para Cp, no obstante para las formas recalcitrantes de Cnox presentó pérdidas del 13,5%.

Tabla 58. Pérdidas de C en las diferentes zonas.

Formas de C	PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CARBONO (tC ha ⁻¹ a 20cm)						
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
Ct	-31,0	-6,1	-8,9	6,9	-51,6	-6,8	-16,3
Cox	-30,9	-6,6	-10,3	7,3	-52,0	-4,8	-16,2
Ch	-14,6	-2,6	-4,3	3,7	-27,8	-0,7	-7,7
Cp	-8,1	11,2	-1,1	6,7	-16,0	-0,2	-1,2
Cnox	-0,1	0,4	1,3	-0,5	0,4	-2,1	-0,1
Cdox	-22,8	-17,8	-9,2	0,6	-36,1	-4,6	-15,0

Tabla 59. Porcentajes de pérdidas y ganancias de las diferentes formas de C.

Formas de C	PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CARBONO (%)						
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	Media
Ct	-28,41	-13,99	-21,65	13,47	-58,51	-15,63	-25,9
Cox	-28,67	-15,27	-26,33	15,33	-59,80	-11,56	-26,6
Ch	-25,48	-10,56	-20,81	15,29	-57,00	-2,87	-23,3
Cp	-25,14	66,42	-6,95	66,84	-75,70	-1,26	-6,8
Cnox	-7,46	83,80	66,56	-13,46	37,92	-80,88	-4,0
Cdox	-30,17	-67,65	-39,58	1,64	-54,71	-16,41	-35,0

3.4. Análisis de componentes principales

Teniendo en cuenta la información de las seis zonas de muestreo, se encontró que el ACP explicó con dos componentes el 85% de la variabilidad total. El análisis mostró por medio de vectores (Figura 3) la correlación entre las variables estudiadas, dejando ver correlaciones positivas entre las diferentes formas de C (excepto Cnox) con los cationes Calcio y Magnesio (sentido oeste) y correlaciones negativas con la forma Cnox y Na en

sentido este; correlación positiva en sentido sur con K, Alp, Fep, Arcilla y limo y correlación negativa en sentido norte con pH, Arena y Da. Los vectores de mayor longitud y más cercanos al eje horizontal hicieron parte del CP1, que fue el más relevante sintetizando las variables asociadas a las formas de C oxidables, la relación C/N y los metales alcalinos Calcio y Magnesio (Figura 3). Los registros mostraron el efecto de la altitud en el momento de proyectarse sobre el plano, agrupándose por zonas; diferenciándose la zona 1 sitio más alto (956 msnm), por presentar los contenidos más altos de C, que fueron disminuyendo hacia las zonas más bajas (5-42) msnm, caracterizadas por la presencia de suelos con pH alcalinos y de texturas ligeramente gruesas.

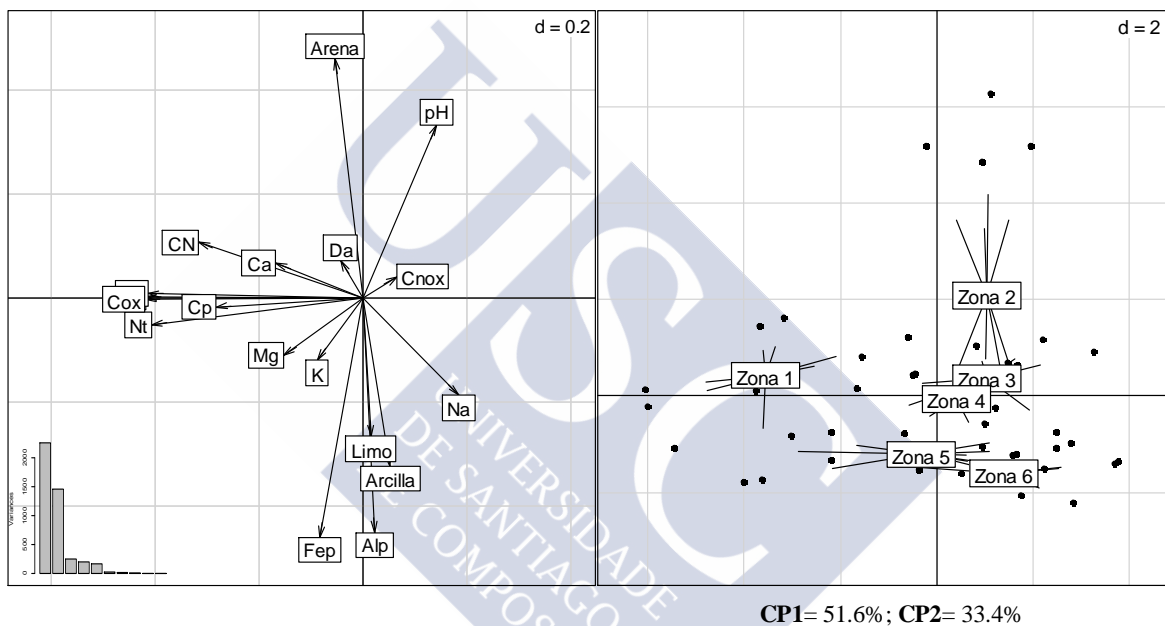


Figura 37. Correlaciones de las variables fisicoquímicas del suelo con los componentes 1 y 2.

3.5. Análisis discriminante.

Tabla 60. Prueba de igualdad de la media de los grupos.

Propiedades	Lambda de Wilks	F	Sig.
pH	0,99	0,71	0,41
Nt	0,92	4,66	0,04
Ct	0,89	6,07	0,02
Ch	0,90	5,73	0,02
Cp	0,98	1,10	0,30
Cnox	1,00	0,00	0,99
Cox	0,89	5,94	0,02
C/N	0,96	2,30	0,14
cCt	0,94	3,21	0,04
Fe_p	0,90	5,30	0,03
Al_p	0,90	5,59	0,02
K	0,99	0,45	0,51
Na	0,98	1,11	0,30
Ca	0,99	0,40	0,53
Mg	1,00	0,03	0,86
Arena	1,00	0,01	0,94
Arcilla	0,99	0,41	0,53
Limo	0,99	0,34	0,56
Da	0,82	10,78	0,00

En la (Tabla 10), se muestra como el Nt, Ct, Ch, Cox, contenido de Ct, Fep, Alp, y Da son predictores significativos por si mismos, a diferencia del resto de propiedades, sin embargo, estos contrastes de medias no tienen en cuenta la correlación entre las variables para predecir futuras clasificaciones de propiedades en un determinado uso del suelo.

Se extrajo una función discriminante que explica el 100% de las diferencias existentes entre las propiedades de los suelos para cada uso, como se muestra en la Tabla 11, el autovalor obtenido por encima de 1 y una correlación canónica moderadamente alta 0.80, nos permite indicar que las propiedades estudiadas permiten diferenciar los cambios en el uso del suelo.

Tabla 61. Autovalores.

Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Correlación canónica
1	1,794a	100	100	0,801

El estadístico Lambda de Wilks expresa la proporción de variabilidad total no debida a la diferencia entre usos del suelo, atendiendo los resultados el valor de Lambda es ligeramente bajo, lo cual significa que no hay mucho solapamiento de las propiedades estudiadas en

relación al uso del suelo, corroborada por la diferencia estadísticamente significativa de 0,001, por lo cual rechazamos la hipótesis nula de que los usos del suelo tienen promedios iguales para las variables discriminantes, (Tabla 12).

Tabla 62. Lambda de Wilks.

Contraste de las funciones	Lambda de Wilks	Chi-cuadrado	gl	Sig.
1	0,358	42,634	17	0,001

Revisando los coeficientes estandarizados de la función discriminante Tabla 14 concluimos que las variables más ponderadas para maximizar la discriminación de los usos del suelo fueron: Nt, Ch, K y Da (signo negativo), pH, Ct, acumulación de C, Alp, Mg (signo positivo).

Tabla 63. Centroides.

Usos	Función
Cultivo	-1,22
Bosque	1,42

Para interpretar los signos de las ponderaciones resulta útil inspeccionar primero la ubicación de los centroides de cada uso (Tabla 13), podemos comprobar entonces que el grupo uso cultivo tiende a obtener puntuaciones negativas en la función discriminante mientras que el grupo uso bosque, tiende a obtener puntuaciones positivas, sabido esto la función discriminante nos indica por ejemplo que valores de C total por encima del promedio (1.95%) para las condiciones edafoclimáticas de las zonas estudiadas hará más probable que el uso obtenga una puntuación positiva y, con ello, que se ajuste a las condiciones de los suelos de bosque; por el contrario valores de C total por debajo de la media será característico de suelos de cultivo. En cuanto a la variable Da un valor por encima de la media (1.45 g cm^{-3}), hará disminuir la función discriminante y será más característico de los suelos de cultivo, lo que se justifica por el mal manejo de muchos suelos dedicados a la agricultura; En relación a las formas de C, obtuvieron puntuación positiva (Ct, Cnox, C/N y la cantidad total de C acumulada) indicativos preferenciales para los suelos de bosque y muy relacionados con la captura de C; puntuaciones negativas para (Nt, Ch y Cp) que corresponden a las formas de carbono más lábiles y de tiempos de residencia más cortos, que es la posible razón de la pérdida de C en suelos de cultivo.

Tabla 64. Coeficientes estandarizados

Propiedades	Función (1)
pH	1,21
Nt	-0,80
Ct	0,43
Ch	-0,40
Cp	-0,12
Cnox	0,05
C/N	0,02
cCt	1,73
Fep	0,25
Alp	1,32
K	-0,65
Na	0,07
Ca	-0,17
Mg	0,95
Arena	0,45
Arcilla	-0,14
Da	-0,92

Basándonos en lo anterior podemos afirmar que los contenidos de Ct y las formas más estables se pueden utilizar como un posible indicador para monitorear la función ambiental del suelo como sumidero de C, pudiendo promover prácticas alternativas de manejo en suelos dedicados a la agricultura en las zonas estudiadas.

4. Conclusiones

La forma oxidable del Carbono representó el 95% del Carbono total para los diferentes usos del suelo, independiente de las zonas edafoclimáticas.

Los almacenamientos de Carbono disminuyen con la altura sobre el nivel del mar, observándose una marcada diferencia entre la zona 1 (956 msnm) y las demás zonas estudiadas, ubicadas por debajo de los 42 msnm.

Es preciso y es posible incrementar el contenido de C total y, en general, el de todas las formas de C. El modelo del suelo cultivado con banano y mango puede ser utilizado.

Es conveniente incrementar el C recalcitrante en los suelos cultivados.

Es importante conseguir un incremento de las formas humificadas siguiendo el modelo de gestión del cultivo de palma

El uso y manejo de los suelos cultivados comparados con los suelos de bosques, influye negativamente en los contenidos de las formas de Carbono más estables, presentándose en promedio pérdidas de Carbono total del orden del 26%.

Los suelos estudiados presentan un potencial considerable para actuar como sumideros de Carbono, siendo la estabilización catiónica especialmente con los cationes polivalentes Ca y Mg el principal mecanismo aparente de estabilización, seguida de la oclusión física de la MOS y por último con muy escasa relevancia la recalcitrancia inherente a sus constituyentes.

Anexo 6. Correlaciones bivariadas de Pearson.

	pH	Nt	Ct	Cox	Ch	Cp	C/N	Cnox
Nt	-0,29							
Ct	-0,25	0,97						
Cox	-0,27	0,97	1,00					
Ch	-0,27	0,94	0,96	0,96				
Cp	-0,35	0,58	0,58	0,59	0,62			
C/N	-0,14	0,59	0,75	0,74	0,71	0,42		
Cnox	0,19	-0,15	-0,13	-0,21	-0,20	-0,25	-0,05	
Fe _p	-0,67	0,22	0,11	0,13	0,15	0,20	-0,14	-0,22
Al _p	-0,55	0,00	-0,08	-0,07	-0,04	0,05	-0,23	-0,19
K	0,13	0,18	0,12	0,11	0,07	-0,18	0,04	0,07
Na	0,18	-0,35	-0,37	-0,37	-0,43	-0,42	-0,31	0,13
Ca	0,18	0,30	0,33	0,31	0,27	0,13	0,35	0,14
Mg	-0,05	0,27	0,22	0,20	0,15	0,06	0,12	0,18
Da	0,08	0,10	0,04	0,03	-0,02	-0,12	-0,04	0,14
Arena	0,45	0,14	0,20	0,20	0,25	0,20	0,23	0,00
Arcilla	-0,44	-0,07	-0,13	-0,13	-0,15	0,03	-0,19	0,03
Limo	-0,13	-0,11	-0,13	-0,13	-0,17	-0,30	-0,11	-0,03

Valores en negrita indican correlación significativa (p<0,05)

Anexo 7. Anova multivariado

VARIABLE	ZONAS	USOS	ZONAS * USOS
pH	0,00	0,02	0,00
Nt	0,00	0,00	0,04
Ct	0,00	0,00	0,07
Cox	0,00	0,00	0,07
Ch	0,00	0,00	0,04
Cp	0,00	0,18	0,00
Cnox	0,25	0,83	0,79
C/N	0,38	0,12	0,26
Fep	0,00	0,00	0,00
Alp	0,00	0,00	0,00
K total	0,00	0,80	0,00
Na total	0,00	0,02	0,00
Ca total	0,00	0,06	0,55
Mg total	0,00	0,29	0,00
Arena	0,00	0,82	0,00
Arcilla	0,00	0,59	0,00
Limo	0,13	0,46	0,00
Da	0,00	0,00	0,94
Cont de Ct	0,00	0,10	0,80

5. Bibliografía

- Acevedo, S., Cruz , M., & Cruz , E. (2002). Distribución de óxidos de hierro, Aluminio y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia*, 36, 401-409.
- Albaladejo , J., Ortiz , R., Garcia, N., Ruiz , A., Almagro , M., García, J., & Martínez, M. (2013). Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *J Soils Sediments*, 13, 265–277.
- Almendros, C. (2004). Investigaciones Básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología*, 11(2), 229-248.
- Bascomb, C. L. (1968). Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *Journal of Soil Science*, 19, 251-256.
- Blair, G. J., Lefroy, R. D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research* , 46, 1459-1466.
- Brevik, E.C. 2009. Soil health and productivity. In: W. Verheye, editor, Soils, plant growth and crop production. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK.
- Brevik, E. (2012). Soils and Climate Change: Gas Fluxes and Soil Processes. Soil Horizons.
- Calvo de Anta, R., Macías, F., & Riveiro, A. (1992). Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña. *Imprenta de la Diputación Provincial*, 87.
- Carvajal, et al. (2009). Soil Organic Carbon in Different Land Uses of Colombian Andean Landscapes, . *J. Soil. Sci. Plant Nutr*, 9(3), 222-235.
- Chesworth, W. (2004). Redox, soils, and carbon sequestration. *Edafología*, 11(1), 37-43.
- Correa Salazar, A. (2005). Pasado Y Futuro De Los Estudios De Materia Orgánica Del Suelo En Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 35(1), 137-155.
- Davidson , E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 41, 12–15.
- Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy, y Zhang, X. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. p. 499–587.

- Ghani, A., Dexter, M., & Perrot, K. W. (2003). Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 655-665.
- Griffith, S. M., & Schnitzer, M. (1989). *Oxidative degradation of soil humic substances*. En: *Humic substances II- In Search of Structure* (ed. M.H. B. Hayes; P. MacCarthy, R.L. Malcolm and R.S. Swift). Chichester.: Wiley.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change. *Global Change Biol*, 8, 345–360.
- Herbert, B., & Bertsch, P. M. (1995). Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution A review. Madison. *Soil Science of America, Inc. En: McFee, W. And Kelly, J. M (eds.) Carbon Forms and Function in Forest Soils*, 63-88.
- Hoffmann , U., Yair, A., Hikel, H., & Kuhn, N. J. (2012). Soil organic carbon in the rocky desert of northern Negev (Israel). *J Soils Sediments*, 12, 811–825.
- Hoyos, N., & Comerford, N. (2005). Land use and andscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from the Colombian Andes. *Geoderma*, 129, 268– 278.
- Ibrahim, M., Cuartas, C., Ponce, G., Vega, V., Casasola, F. y Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* N °4 5
- IDEAM. (2006). *Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero*. 29p. Colombia.
- IGAC. (1995). Estudio general de suelos de la zona quebrada de la sierra nevada de Santa Marta. Colombia. 385.
- IGAC. (2009). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena. 496p.
- IGAC- CORPOICA. (2002). Zonificación de los Conflictos de Uso de las Tierras en Colombia. 87 p.
- Ilsley, W. H., Zingano, R. A., & Zoeller, J. H. (1986). The reactivity of ruthenium tetroxide towards aromatic and etheric functionalities in simple organic compounds. *Fuel*, 65, 1216-1220.
- IPCC. 2007b. Climate change 2007 synthesis report. In: R.K. Pachauri and A. Reisinger, editors, Working group contributions to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. p. 23–73. Lal, R. 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60:708–721. doi:10.1525/bio.2010.60.9.8
- Jenkins, D. S. (1988). The turnover of organic matter in soil. In: Wild, A. (Ed.), *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*. Longman Scientific and Technical, Harlow,. 564–607.

- Jiménez, Y., Martínez, C., & Mancera, N. (2010). Características Físicas Y Químicas del Suelo en Diferentes Sistemas de Uso y Manejo en el Centro Agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Revista Suelos Ecuatoriales*. ISSN: 0562-5351, 40(2), 176-18.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623–1627.
- Lal, R. (2005). Los Suelos y El Cambio Climático Protección del Suelo y Desarrollo. *Instituto Geológico Minero de España. Serie: Medio Ambiente N° 6.*, 163-177.
- Lal, R. (2008a). Carbon sequestration. *Philos. Tran. R. Soc.*, 363, 815–830.
- Lal, R. (2008b). Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 81, 113–127.
- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60:708–721. doi:10.1525/bio.2010.60.9.8
- Le Quéré, C., Raupach, M. R., Canadell, J. G., & Marland, G. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci*, 2, 831–836.
- Loginow, W., Wisniewski, W., Gonet, S., & Ciescinska, B. (1987). Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 20, 47-52.
- López-Ulloa, M., Veldkamp, E., & De Koning, G. (2005). Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1110-1117.
- Macías, F. (2004). Sumideros de carbono para el forzamiento climático antropoceno. Una visión de alternativas de actuación desde la ciencia del suelo. *Edafología*, 11(1), 7-25.
- Macías, F., Calvo de Anta, R., Rodríguez Lado, L., Verde, r., Pena, X., & Camps Arbostain, M. (2004). El sumidero de Carbono de los Suelos de Galicia. *Edafología*, 11(3), 341-376.
- Malagon, D. (s.f.). Ensayo Sobre Tipología De Suelos Colombianos; Énfasis En Génesis Y Aspectos Ambientales. 2003, 319-342.
- Moreno, F. H., & Lara, W. (2003). Variación de carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios En Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. S.A. 50.
- Mosquera, O., Buurman, P., Ramir, B. L., & Amezquita, M. C. (2012). Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. *Geoderma*, 189–190, 81–86.
- Mosier, A.R. (1998). Soil processes and global change. *Biol. Fertil. Soils* 27:221–229. doi:10.1007/s003740050424

- Oades, J. M., Gillman, G. P., & Uehara, G. (1989). Interactions of soil organic matter and variable charge clays. En: D.C. Coleman, J.M. Oades and G. Uehara (Editors), *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*, Niftal, University of Hawaii. 69-95.
- Parsons, J. W. (1989). *Hydrolytic degradations of humic substances*. En: "Humic substances II. In Search of Structure" (ed. M. Hayes; P. MacCarthy, R. Malcolm y R. Swift). Chichester: Wiley.
- Paul, E. A., Follett, R. F., Leavitt, S. W., Halvorson, A., Peterson, G. a., & Lyon, D. J. (1997). Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1058–1067.
- Paul, E., Morris, S. J., Conant, R. T., & Plante, A. F. (2006). Does the acid hydrolysis–incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1023–1035.
- Piccolo, A. (2012). *The Nature of Soil Organic Matter and Innovative Soil Managements to Fight Global Changes and Maintain Agricultural Productivity*. En: *Carbon Sequestration in Agricultural Soils. A multidisciplinary approach to innovative methods*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.*, 6, 317–327.
- Prentice IC. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, climate change: the scientific basis IPCC. Cambridge(2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, climate change: the scientific basis IPCC.
- Ridley, A. M., Helyar, K. R., & Slattery, W. J. (1990). Soil acidification under subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) pastures in North-Eastern Victoria. *Aust. J. Exper. Agric.*, 30, 195–201.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176.
- Smith, P. (2008). *Soil Organic Carbon Dynamics and Land-Use Change* En: *Land Use and Soil Resources*. A.K. Braimoh and P.L.G. Vlek (eds.). Springer Science + Business Media B.V.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007. Agriculture. In: B. Metz et al., editors, *Climate change (2007): Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. p. 497–540.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry. Genesis, composition, reactions* (Segunda ed.). New York: Wiley.

- Stockmann, U., Adams, M., Crawford, J., Field, D., Nilusha, H., Meaghan, J., . . . Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic Carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, 80–99.
- Suarez, M. (2013) Caracterización de la materia orgánica del suelo (SOM) y biogeoquímica de suelos de carga variable. Universidad Santiago de Compostela. España.
- Tan, Z., & Lal, R. (2005). Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111, 140-152.
- Tirol-Padre, A., & Ladha, J. K. (2004). Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 969-978.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and waterstable aggregates in soils. *J Soil Sci*, 33, 141-163.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.
- Vásquez, J. R., & Baena, D. (2009). Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. 103.
- Vásquez, J. R., Macías, F., & Menjivar, J. C. (2011). Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60(4), 369-379.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessac, H., Guggenberger, G., Matzner, E., & Marsch, B. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry*, 2183–2207.
- von Lützow, M., & Kögel-Knabner, I. (2009). Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know? *Biol Fertil Soils*, 46, 1–15.
- Wershaw, R. L., Pinckney, D. J., & Booker, S. E. (1977). Chemical structure of humic acids- Part 1. A generalized structural model. *J. Research U.S. Geol. Survey*, 5, 565-569.





Capítulo 5.

Respiración del suelo y su relación con algunas formas de Carbono

Este capítulo ha sido publicado en la Revista Bioagro 25(3). 2013

<http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev25%283%29/4.%20MS%201316.pdf>



RESPIRACIÓN DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS FORMAS DE CARBONO

Resumen

Las prácticas de uso y manejo de los suelos, pueden afectar notablemente las fracciones lábiles y humificadas de su materia orgánica, en detrimento de la actividad biológica. El presente estudio se propuso evaluar el efecto que sobre la respiración tienen los cambios de uso del suelo y su relación con algunas formas de Carbono. Para la tasa de respiración medida por gramo de suelo y por gramo de Carbono oxidable (Cox), se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las zonas de estudio, diferenciándose claramente dos grupos de zonas, un primer grupo (Zonas 1, 2 y 3) con tasas de respiración que oscilaron entre 3 y 4 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$; 124,5 y 279,5 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$ y un segundo grupo (Zonas 4,5 y 6) con tasas de 0,9 y 1,9 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$; 72,8 y 95,3 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$; la variable respiración por gramo de Cox, observó diferencias estadísticas entre usos del suelo, registrándose para bosques una tasa de respiración con 27,42 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$ menos que los suelos de cultivo. En general la respiración del suelo se correlacionó positivamente con todas las formas de C estudiadas, excepto la forma no oxidable, confirmando su carácter recalcitrante. La actividad biológica por gramo de suelo fue mayor en suelos de bosques 2,74 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ frente a una tasa media de 2,20 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ para los suelos cultivados, en contraste con la respiración media en función de Cox, donde los suelos de bosques presentaron menores emisiones de CO_2 , corroborando que un manejo inadecuado de los suelos de cultivo puede incrementar las emisiones de CO_2 a la atmósfera.

Palabras Claves: Formas de Carbono, Respiración del suelo, fuentes y sumideros de Carbono.

The relationship between microbial respiration and some carbon forms in soils under different land-use in the province of Magdalena (Colombia).

Abstract

Land-use and soil management affect labile and humified fractions of soil organic matter (SOM), thus reducing the biological activity. The objective of this study was to evaluate the effect of land-use on soil respiration and its relationship to some carbon forms. The studied sites were located in the northwest of the province of Magdalena (Colombia). The

microbial activity was measured by the respiration rate. According to the respiration rate, the studied sites could be differentiated into two main areas, the first area (Zones 1, 2 and 3) showed respiration rates that ranged between 3 - 4 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s. h}^{-1}$; 124,5 y 279,5 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$, and a second area (Zones 4, 5 and 6) showed rates of 0,9 -1,9 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s. h}^{-1}$; 72,8 y 95,3 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$. SOM gave average values for both agricultural soils and forest soils; the average total carbon (Ct) content was higher in the forest soils. Broadly soil respiration correlated positively with all studied C forms, except the non-oxidized C, which confirms the recalcitrance that constitutes it. The respiration by g soil^{-1} was higher in forest soils compared to cultivated ones, which is due to the higher total carbon content and a greater biological diversity. However, respiration rate analyses also depend on the Cox content, which agreed lower CO_2 emissions observed at the forest soils. The results confirm that agricultural soils can be potential sources of CO_2 to the atmosphere.

Key words: Carbon forms, Soil Respiration, Carbon sinks, Carbon sources.

1. Introducción

La respiración del suelo se define como la producción total de CO_2 , por unidad de área y de tiempo, debida a la respiración de organismos edáficos, raíces, hifas micorrícicas, y en menor extensión, por la oxidación bioquímica de los compuestos de carbono (Raich y Schlesinger 1992, Lloyd y Taylor 1994, Yi *et al.* 2007).

A partir de la década de los 90s, se ha prestado mucha atención a la respiración edáfica, ya que este proceso ecológico se reconoce como la principal fuente de flujo de carbono procedente de la superficie del suelo y uno de los componentes cruciales dentro del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres (Raich y Schlesinger 1992, Raich y Potter 1995). Se ha reportado que la respiración del suelo podría representar del 40 al 90% de la respiración de los ecosistemas forestales (Murcia, 2008). En una escala global, la respiración del suelo produce 80,4 Pg C-O_2 anualmente (1Petagramo $\text{Pg}=10^{15}\text{g}$), el cual es aproximadamente 10 veces más alto que la combinación de la deforestación y la combustión de compuestos fósiles. Así, pequeños cambios en la respiración del suelo pueden influir enormemente en la concentración del carbono atmosférico y en el balance calórico (Veenendaal *et al.*, 2004, Kane *et al.*, 2005). Por ello la respiración del suelo se ha convertido en el evento central de los cambios ecológicos globales debido a su papel controversial en los procesos de calentamiento

global ya que contribuye a determinar si un ecosistema dado se comporta como fuente o sumidero de CO₂ (Jassal *et al.*, 2007).

La materia orgánica activa, que representa alrededor del 10-20 % de la materia orgánica total del suelo, está constituida por la microbiota responsable de los procesos de descomposición de los substratos orgánicos (fracción lábil) y de la resíntesis de sustancias que dan origen a otros productos metabólicos como mucílagos, gomas, ácidos, enzimas, polisacáridos extracelulares y por supuesto CO₂. De tal manera que la medición del dióxido de carbono respirado es una estimación de la actividad y, por lo tanto, de la presencia microbiana; tal actividad varía en función de diferentes factores, como el uso del suelo, mineralogía, cobertura vegetal, prácticas de manejo, calidad de los residuos que entran al sistema, etc. (Mora, 2006). Las prácticas de cultivos ejercen numerosos efectos biológicos directos e indirectos sobre las poblaciones microbianas del suelo. La influencia del arado es muy intensa sobre las poblaciones de bacterias inmediatamente después de la ruptura del suelo, el número de microorganismos aumenta 20 ó 30 veces. Esto debido a la modificación de las condiciones de porosidad y por lo tanto del flujo de gases y agua a través de los espacios vacíos (Mora, 2006).

En el estudio realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1993), donde se evaluó la distribución de las poblaciones de hongos, actinomicetos y bacterias, bajo diferentes usos de la tierra, se llegó a la conclusión de que los suelos bajo bosque presentan el más alto índice de diversidad y de riqueza biológica, como también la tasa más alta de producción de CO₂, en tanto que la mayor densidad poblacional fue aislada en suelos de piedemonte y valles, donde los últimos presentan el número más alto de hongos y bacterias.

Atendiendo la importancia de la respiración como un indicador de la actividad biológica de los suelos y en consideración a la demanda actual por el estudio cualitativo de la materia orgánica y el efecto del uso de la tierra sobre ella, este trabajo se propuso evaluar el efecto del uso de los suelos al noroccidente del departamento del Magdalena, en la actividad biológica medida indirectamente por el CO₂ respirado y su relación con algunas formas de C.

2. Materiales y Métodos

Los detalles del muestreo y la descripción del area del estudio se referencian en el capítulo 2.

Determinaciones químicas. pH en H₂O en una relación 1:2.5. Fósforo disponible por el método Olsen y P total mediante digestión ácida y análisis por colorimetría; Nitrógeno (N), Azufre (S) y Carbono total (Ct) se determinaron mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI).

Determinación de las formas de Carbono: la forma de Carbono orgánico (Cox) fue estimada basándose en la oxidabilidad de la materia orgánica y aprovechando su inestabilidad termodinámica (Velasco, 2010), mediante la técnica Walkley y Black (1934), la materia orgánica (MO) calculada multiplicando el Cox por el factor 1,724; no obstante se ha comprobado que en muchos suelos hay formas de Carbono no oxidables, incluso con la técnica del dicromato en medio ácido y caliente, la aparición del “black carbón” y de las formas recalcitrantes de C han puesto en entredicho que los métodos de oxidación con dicromato sean los adecuados para determinar el contenido de Carbono total (Ct) de los suelos y obligan a determinarlo por un método de mayores garantías como serían los de combustión a más de 1000 °C y con corriente rica en O₂, determinando el Ct a partir del CO₂ desprendido. La diferencia entre el Ct así obtenido y el C obtenido por la oxidación ácida en caliente Cox puede utilizarse entonces como una estimación del C no oxidable o más recalcitrante (Cnox) (Macías *et al.*, 2004). El C ligado a la fracción húmica del suelo (Cp) se determinó conforme a la metodología descrita por Bascomb (1968) basada en el poder complejante del pirofosfato sódico. Las formas de Carbono no complejadas por la MO, difícil o lentamente oxidables (Cdox) fueron calculadas por diferencia entre Cox-Cp, según Rodríguez *et al.* (2004).

Determinaciones respirométricas: se empleó un Respirómetro (*Micro-Oxymax*) de circuito cerrado automatizado, casa comercial Columbus Instruments. Para este análisis se pesaron 30 g de muestra, llevando la humedad a capacidad de campo y ajustando la temperatura entre los 25 y 26 °C; se tomaron tres lecturas por muestra, cada 24 horas durante 72 horas, los valores de respiración fueron expresados en función del tiempo, en $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$ y $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$, acorde a lo descrito por Pardo y Macías (2006).

Análisis de los resultados: los datos fueron analizados, mediante análisis de varianza multivariado a dos vías (manova factorial), con el objeto de establecer las posibles diferencias estadísticas para las variables relacionadas con la respiración del suelo ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$ y $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$) entre zonas de muestreo, usos del suelo y la interacción zona*uso,

además se correlacionaron los datos de respiración con el pH, P, S y N, C/N y las formas de Carbono determinadas (Ct, Cox, Cp, Cdox y Cnox). La relación entre la respiración edáfica media diaria y los parámetros relacionados con las formas de Carbono del suelo, se llevaron a cabo a través de un análisis de correlación paramétrico de Pearson.

3. Resultados y discusión

Tabla 65. Valores medios por zonas de algunas propiedades químicas.

PROPIEDADES	SUELOS DE CULTIVO							SUELOS DE BOSQUE						
	ZONAS							ZONAS						
	1	2	3	4	5	6	Media	1	2	3	4	5	6	Media
pH	5,59	6,31	6,51	6,89	7,07	8,58	6,82	6,52	5,62	7,03	7,79	7,14	8,69	7,13
% N	0,23	0,12	0,13	0,17	0,13	0,12	0,15	0,31	0,17	0,13	0,15	0,25	0,15	0,19
% MO	4,43	2,25	1,98	3,19	1,97	2,17	2,67	6,64	2,80	2,82	2,81	5,54	2,62	3,87
C/N	11,4	11,1	9,8	11,3	10,2	10,9	10,8	12,4	9,7	11,7	12,0	12,5	10,2	11,4
% S	0,05	0,03	0,07	0,07	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,04	0,06
P total (ppm)	1031	124	376	5597	963	1221	1552	596	156	353	1483	746	1221	759
P olsen (ppm)	7,98	28,93	32,03	22,93	29,71	19,91	23,58	10,53	13,40	28,74	19,07	34,25	37,81	23,97

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las determinaciones químicas en los suelos estudiados, en general se presentan valores de pH ligeramente ácidos a moderadamente alcalinos tanto para los suelos de cultivo como para los suelos de bosques; en la zona 1, cultivo café, en contraste con las demás zonas, se caracteriza por tener suelos ligeramente ácidos, adecuados para este tipo de cultivo, marcados por la diferencia de altitud 956 msnm y una mayor pluviosidad, 2000 mm, lo que favorece el lavado de bases. De hecho es el bosque húmedo el único en el que el balance de agua mensual P-ET pone de manifiesto la superación de la reserva de agua y, por tanto, la existencia de varios meses con presencia de infiltración del agua en el suelo; las demás zonas no superan los 50 msnm ni los 1300 mm de precipitación media y el balance mensual de agua indica que no hay agua infiltrada en ningún período del año. Esto explica el predominio de condiciones de pH en torno a la neutralidad e incluso una cierta alcalinidad, característica deseable para el buen desarrollo de la mayoría de los cultivos pero que plantea el problema de la importancia del estrés hídrico; en los suelos de la zona 6 se presentaron condiciones de moderada alcalinidad, la cual es evidente por su régimen climático (ústico isohipertérmico) y con una alta tasa de evapotranspiración que excede notablemente a la pluviosidad media anual, favoreciendo a su vez una alta saturación de metales alcalinotérreos, siendo el Ca^{2+} el catión dominante en el complejo de cambio (Vásquez y Macías, 2011). A excepción de las zonas 1 y 5, se presentaron valores medios de N total y MO para las condiciones climáticas de la costa caribe colombiana, no obstante en la zona 1, las condiciones de temperatura, precipitación y las considerables entradas de

material vegetal a los suelos, favorecen los procesos de acumulación de materia orgánica, en su mayoría constituidas por formas de carbono oxidables de rápida mineralización, acorde a lo descrito por (Vásquez y Macías, 2011). Las relaciones C/N para los suelos de cultivo oscilaron entre 10 y 11, y para suelos de bosque entre 10 y 13, valores consecuentes con la alta tasa de mineralización reportada para las condiciones climáticas de la región (IGAC, 2009). Los contenidos de P total y S total en su mayoría se encuentran en el rango de valores normales reseñados para suelos minerales (300 a 1500 ppm para P) y (0,02 a 1% para S), no obstante en los suelos de cultivo (banano convencional) de la zona 4, se presentaron valores de P total superiores a 5500 ppm, esto debido posiblemente a una alta precipitación de fosfatos insolubles por la gran cantidad de calcio intercambiable existente, sumado a una alta fertilización con superfosfatos concentrados que traen como consecuencia una precipitación de fosfato tricálcico insoluble; en este mismo sentido se observa como el P olsen, que representa las formas lábiles disponibles para las plantas, constituye menos del 1% del P total para los suelos en todas las zonas estudiadas.

Tabla 66. Propiedades relacionadas con las formas de Carbono.

PROPIEDADES	SUELOS DE CULTIVO							SUELOS DE BOSQUE						
	ZONAS							ZONAS						
	1	2	3	4	5	6	Media	1	2	3	4	5	6	Media
% Ct	2,61	1,34	1,28	1,92	1,28	1,28	1,62	3,90	1,64	1,72	1,76	3,26	1,62	2,32
% Cox	2,57	1,31	1,15	1,85	1,15	1,26	1,55	3,85	1,62	1,64	1,63	3,22	1,52	2,25
% Cp	0,80	1,00	0,59	0,53	0,18	0,45	0,59	1,15	0,63	0,67	0,34	0,78	0,49	0,68
% Cdox	1,77	0,31	0,56	1,32	0,97	0,81	0,95	2,70	0,99	0,97	1,29	2,43	1,03	1,57
% Cnox	0,045	0,034	0,134	0,067	0,137	0,017	0,072	0,055	0,019	0,082	0,124	0,042	0,096	0,070
µg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo h ⁻¹	3,11	2,51	4,28	1,23	1,19	0,87	2,20	4,90	3,65	3,08	1,21	2,66	0,95	2,74
µg C-CO ₂ g ⁻¹ Cox h ⁻¹	121,13	191,76	372,09	66,34	104,07	69,17	154,09	127,38	224,92	188,06	74,39	82,59	62,66	126,67

En cuanto a la relación de las diferentes formas de C estudiadas y teniendo en cuenta que el Ct está conformado por la forma oxidable total Cox más la forma no oxidable Cnox y a su vez el Cox está constituido por las formas complejadas Cp y las difícilmente oxidables representadas por la forma Cdox (Tabla 2), vemos como el Cox tanto para suelos de bosque como para cultivos representó como media, un 95% del Ct y solo un 5% lo constituye la forma Cnox o Carbono con una elevada estabilidad que garantiza considerables tiempos de residencia en los suelos, los mayores contenidos de Cnox aproximado al 10% del Ct se presentaron en las zonas: 3 suelo arado, 5 cultivo frutales y 6 bosque muy seco tropical, donde sería interesante avanzar en estudios que permitan determinar los mecanismos de estabilización naturales del C presentes en estos suelos.

El Carbono ligado a la fracción húmica y a formas muy lábiles Cp, representó el 38% del Cox en suelos de cultivo y el 30% en suelos de bosques; si analizamos la fracción de C oxidable no extraíble con pirofosfato (Cox-Cp), debe atribuirse a las fracciones que ya han escapado a la actividad biológica, e incluso a los procesos oxidativos normalmente existente en los suelos, en donde su intensidad (Eh: 300-500 mvol, en suelos bien drenados) es muy inferior a la existente en condiciones del método utilizado para extraer la fracción Cox (Eh: > 1000 mvol. Macías *et al.*, 2004), encontramos entonces un mayor porcentaje de C asociado a fracciones más estable en suelos de bosques (70%), frente a un (62%) en suelos cultivados, siendo la zona 2 cultivo de Palma con un 77% del Cox representado por el Carbono extraíble con pirofosfato quien presente los suelos con mayores contenidos de fracciones de C lábiles; quedando demostrado el efecto del uso y manejo de los suelos de cultivo en detrimento de los contenidos de las formas más estables de C.

Teniendo en cuenta los resultados del ANOVA factorial multivariado (manova) para las variables relacionadas con la respiración del suelo, se encontraron diferencias estadísticas significativas para las dos variables en relación al factor zona, pero para el factor uso y la interacción zona*uso solo presentó diferencia estadística significativa la variable expresada en $\mu\text{g C-CO}_2\text{g}^{-1}\text{Cox.h}^{-1}$.

Tabla 67. Prueba de Tukey para respiración por zonas.

ZONAS	$\mu\text{g C-CO}_2\text{ g}^{-1}\text{ suelo h}^{-1}$	$\mu\text{g C-CO}_2\text{ g}^{-1}\text{ Cox h}^{-1}$	GRUPOS
1	4	124,5	A
2	3,09	204,4	A
3	3,66	279,5	A
4	1,23	72,8	B
5	1,93	95,3	B
6	0,93	76,4	B

La prueba de Tukey para el factor zona (Tabla 3) permitió diferenciar el comportamiento de la respiración del suelo en dos grupos de zonas, un primero conformado por las zonas 1, 2 y 3 y caracterizado por valores medios de respiración entre 3 y 4 $\mu\text{g C-CO}_2\text{ g}^{-1}\text{ suelo h}^{-1}$; 124,5 y 279,5 $\mu\text{g C-CO}_2\text{g}^{-1}\text{ Cox h}^{-1}$ y un segundo grupo integrado por las zonas 4, 5 y 6 con valores entre 0,9 y 1,9 $\mu\text{g C-CO}_2\text{ g}^{-1}\text{ suelo h}^{-1}$; 72,8 y 95,3 $\mu\text{g C-CO}_2\text{g}^{-1}\text{ Cox.h}^{-1}$, corresponde entonces una mayor tasa de respiración a las zonas 1, 2 y 3 que al considerar sus características edafoclimáticas coinciden en una mayor precipitación media anual mayor de

1200 mm y valores de pH cercanos a la neutralidad, en comparación a las zonas 4, 5 y 6 donde la precipitación no supera los 880 mm y los suelos con pH alcalinos, esto sumado a que aspectos inherentes al manejo, como la incorporación de restos vegetales, implementación de coberturas, el efecto del sombrero sobre el suelo en los cultivos de café y palma de las zonas 1 y 2, y su actuación en la descomposición de tales residuos pueden estar influenciando una mayor actividad microbiana en estas zonas; se resalta también el hecho que la zona 3 presente el mayor valor de respiración en función del Cox, explicado claramente por el efecto que tiene haber muestreado el suelo recién preparado para la siembra con la consecuente exposición de MO ligado al incremento significativo en la actividad microbiana, acorde a lo descrito por Paul y Clarck (1989).

Tabla 68. Prueba de contraste simple para usos del suelo.

Uso Bosque, respecto Uso Cultivo	Variables dependientes	
	$\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$	$\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox h}^{-1}$
Estimación del contraste	0,558	-27,42
Valor hipotetizado	0	0
Diferencia (Estimado - Hipotetizado)	0,558	-27,42
Error típ.	0,33	10,98
Sig.	0,099	0,03*

Analizando los resultados de la prueba de contraste simple de las variables de respiración para usos del suelo (Tabla 4), vemos como los estimados de la prueba muestran que, en promedio los suelos de bosques registran una tasa de respiración con $27,42 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cox.h}^{-1}$ menos que los suelos de cultivo ($154,7$ para cultivo y $129,7$ para bosque), mientras que los mismos suelos de bosques registran una tasa de respiración con $0,5 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo h}^{-1}$ más que los suelos de cultivo; con base en lo anterior podemos afirmar que para las condiciones edafoclimáticas del estudio, los sitios de bosques emiten más C-CO₂ por gramo de suelo que los sitios de cultivo, influenciado probablemente por una mayor población de microorganismos presente en los suelos de bosques naturales y el efecto de los cultivos en la disminución de la diversidad microbiana, acorde a lo descrito en el estudio realizado por (IGAC,1993) donde se evaluó la distribución de poblaciones de microorganismos bajo diferentes tipos de usos del suelo al occidente del departamento del Caquetá, concluyendo entre otros aspectos que los suelos de bosques presentaron la mayor tasa de producción de CO₂ y una mayor riqueza biológica. Sin embargo cuando analizamos la producción de CO₂ en función del Cox que representa la fracción base para el cálculo de los contenidos de MO, vemos como se invierte en gran parte el efecto y observamos entonces que

los suelos de bosques con un valor medio de 129,6 en relación a los suelos de cultivo con valores de respiración media de 154,7; actúan mejor como sumideros de carbono, teniendo en cuenta la calidad de las entradas de MO y los mecanismos naturales de estabilización del C en estos ecosistemas, confirmando lo expuesto por (Lal, 2005) en relación a que los cambios en el uso de los suelos conlleva al aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por último vemos como para la variable respiración en función del Cox, la significancia de la prueba es menor de 0,05 por lo que concluimos que las diferencias encontradas no se deben al azar, mientras que para la respiración en función de gramos de suelo la significancia es cercana al 0.1, de modo que en un cierto porcentaje las diferencias entre usos del suelo para esta variable puede deberse a una variación aleatoria.

Tabla 69. Coeficientes de correlación de Pearson de la respiración del suelo con algunas propiedades químicas.

VARIABLES	µg C-CO₂ g⁻¹ suelo h⁻¹
Ct	0,586(**)
Cox	0,589(**)
Cp	0,563(**)
Cnox	-0,119
C/N	0,392(**)
Cdox	0,483(**)
pH	-0,59 (**)
P	-0,316 (*)
S	0,366(*)
N	0,590(**)

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

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

En la Tabla 5, se observa como la respiración del suelo tuvo correlación positiva altamente significativa con las diferentes formas de C determinadas, a excepción de la forma Cnox, lo cual nos indica que efectivamente esta fracción es muy recalcitrante y escapa a la acción microbiana; de igual manera se confirma que dentro de las formas de Carbono oxidable, la forma Cp es más susceptible al metabolismo microbiano que la forma Cdox. Igualmente se presenta una correlación significativa con los contenidos de S y N, que son constituyentes importantes de la MO y del metabolismo microbiano, una correlación negativa con los contenidos de P total, con una alta proporción de las forma inorgánica, que de acuerdo a lo descrito por Coyne (2000) podría interpretarse por el hecho de que altos niveles de P inorgánico inhiben la actividad de la fosfatasa y la mineralización del P orgánico; de igual

Capítulo 5. Respiración del Suelo

manera se observó una correlación negativa con el pH, confirmando para las condiciones edáficas de las zonas estudiadas, que a medida que los suelos tienden a un incremento de la alcalinidad se inhibe en un alto porcentaje la respiración del suelo como medida indirecta de la actividad microbiana.



4. Conclusiones y recomendaciones

La respiración del suelo está correlacionada positivamente con las formas del C estudiadas (Ct, Cox, Cp y Cdox) y existe una clara correspondencia entre la emisión de CO₂ y el grado de oxidabilidad de las formas de C; sin embargo, se encontró que los altos contenidos de P inorgánico y pH limitan ligeramente la actividad microbiana.

La forma de Carbono Cnox, no presentó correlación significativa con la respiración del suelo; éstas formas de C no oxidable limitan la actividad microbiana escapando de su acción metabólica, por mecanismos de estabilización inherentes a cada suelo, bien sea por la naturaleza química intrínseca de la MO ó por la oclusión física de la misma, el estudio entonces de estos mecanismos de estabilización naturales se constituye en una herramienta fundamental para manejar los suelos como verdaderos sumideros de Carbono.

La respiración del suelo puede ser utilizada entre otros aspectos como un indicador sensible para evaluar la capacidad de fijación de Carbono de los suelos frente al cambio climático.

Los suelos de bosques presentaron en promedio una mayor actividad microbiana por gramo de suelo, evidenciando posiblemente una mayor diversidad biológica en estos ecosistemas; en contraste con la tasa de emisión de CO₂ por gramo de C oxidable, donde los suelos de cultivo presentaron un promedio mayor que los suelos de bosques, lo que puede interpretarse teniendo en cuenta que hay menos C, pero de mayor labilidad y por el efecto inductor de mineralización de la materia orgánica que va asociado a las perturbaciones ligadas al laboreo, fertilización, etc..

5. Bibliografía

- Alvarez, J. y M. Anzueto. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* volumen 38, número 1:13-22.
- Brady, N. y R. Weil. (2002). *The nature and propiedades of soils* (13 ed.). New Jersey: Prentice-Hall. 653p.
- Burbano, H. (1989). *El Suelo: Una visión de sus componentes Biórganicos*. Pasto: Colciencias-Universidad de Nariño.447p.
- Coyne , M. (2000). *Microbiología del Suelo: Un enfoque exploratorio*. Madrid.España: Paraninfo. 416p.
- Gonzalez, J. y C. Moreno. (2006). *Diversidad de plantas asociadas al cultivo de la palma de aceite*. Trabajo de Grado Ingeniería Agronómica, Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia. 107p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (I.G.A.C.) (1993). *Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del occidente del departamento del Caquetá*. Bogotá. Colombia : INPA-IGAC. *In: Tercer Mundo*. 561p.
- I.G.A.C. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá. Colombia. p. 720-725.
- I.G.A.C. (2009). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena*. 496p.
- Instituto Colombiano Agropecuario (I.C.A.). (1992). *Manual del laboratorio de suelos*. Bogotá.Colombia. 218p.
- Lal, R. (2005). *Los Suelos y el cambio climático. Protección del Suelo y Desarrollo Sostenible*. Instituto Geológico Minero de España. Serie: Medio Ambiente N° 6:163-177. 257p.
- Jassal, R.S., T.A. Black, T. Cai, K. Morgenstern, Z. LI, D. Gauymont-Guay y Z. Nestic. (2007). *Components of ecosystems respiration and an estimate of net primary productivity of an intermediate-aged Douglas-Fir stand*. *Agric. For. Meteorol.* 144: 44-57.
- Kane, E.S., D.W. Valentine, E.A.G. Schuur, y K. Dutta. 2005. *Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska*. *Can. J. Forest Res.* 35: 2118-2119.
- Lloyd, J. y A. Taylor.(1994). *On the temperature dependence of soil respiration*. *Functional Ecology*. 8: 315-323.
- Macías, F. y M. Camps. (2005). *Suelo y cambio climático: Capacidad de fijación de carbono en sistemas edáficos*. (A. Callaba, I. Ibarren, y P. Fernandez-Canteli, Edits.)

Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.España. Serie Medio Ambiente. Nº 6. ISBN: 84-7840-573-9:179-188.

- Macías, F. Calvo de Anta, R. Rodríguez Lado, L. Verde, R. Pena, X. y Camps Arbest, M. (2004). El Sumidero de Carbono de los suelos de Galicia. *Edafología*. 11(3): 341-376
- Mora, J. (2006). La actividad Microbiana: un indicador integral de la. calidad del suelo. Recuperado el 11 de Octubre de 2012, de Revista Luna Azul de la Universidad de Caldas ISSN 1909-2474: Diponinible en http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/9cc8db94Revista5_6_9.pdf [Fecha Revisión 11 de Octubre de 2012]
- Murcia, M. y M. Ochoa. (2008). Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del Bosque Altoandino En La Cuenca Del Río Pamplonita, Colombia. *Caldasia* 30(2): 337-353.
- Pardo, R. y F. Macias. (2006). Aplicación de los Métodos Respirométricos al estudio de la actividad biológica en diferentes suelos de Galicia. Santiago de Compostela. España. Trabajo de final de Máster. Universidad de Santiago de Compostela. 75p.
- Paul, E. y F. Clark. (1989). Soil microbiology and biochemistry. San Diego. *In: Academic press Inc.* 273p.
- Raich, J.W. y W.H. Schlesinger. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climate. *Tellus*. 44B: 81-99.
- Vásquez, J. R. 2010. Variabilidad Espacial de Propiedades Físicas y Químicas en suelos de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena. *Revista acta agronómica*, 59(4):449-456.
- Vásquez, J. R., y Macías, F. (2011). Formas de Carbono Orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Revista acta agronómica*, 60(4), p. 369-379.
- Velasco, M., J. Almeida, P- Vidal. y F.Macias.(2010). Fraccionamiento químico de carbono en Acrisolas con horizontes sómbricos del Sur de Brasil. *Revista de Ciencias Agrarias*. 33(1):278-286.
- Veenendaal, E.M., O. Kolle y J. Lloyd. (2004). Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad - leaved semi - arid savanna – Mopane woodland- in Southern Africa. *Global Change Biol.* 10, 318-328.
- Yi, Z., Fu, S., Yi, W., Zhou, G., Mo, J., Zhang, D., Ding, M., Wang, X. y L. Zhou. (2007). Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China. *Forests Ecology and Management* 243: 178-186.





**Capítulo 6. Composición Molecular de la Materia Orgánica Extraíble
con NaOH: un Estudio con Pirólisis (P-CG/EM).**



COMPOSICIÓN MOLECULAR DE LA MATERIA ORGÁNICA EXTRAÍBLE CON NaOH: UN ESTUDIO CON PIRÓLISIS (P-CG/EM)

Resumen

El presente estudio se propuso determinar la composición molecular de la materia orgánica (MO) en suelos con diferentes usos; para ello se caracterizó por pirólisis (acoplada a cromatografía de gases y espectroscopía de masas), la MOS extraída con NaOH, de muestras superficiales de suelos cultivados y de bosques, en 6 zonas del clima cálido tropical del departamento de Magdalena (Colombia). Como producto del análisis fueron cuantificados 110 productos de pirólisis en la siguiente proporción: compuestos con N ($34,1 \pm 5,1$ %), polisacáridos ($21,1 \pm 7,1$ %), aromáticos ($20,0 \pm 4,5$ %), alifáticos ($7,7 \pm 1,4$ %), fenoles ($7,0 \pm 5,0$ %), poliaromáticos ($3,6 \pm 0,9$ %), ligninas ($0,3 \pm 0,3$ %) y compuestos no identificados ($0,2 \pm 0,1$ %). A través del análisis de varianza no se encontraron diferencias estadísticas entre los productos de pirólisis para usos del suelo (bosque y cultivados), pero si para las zonas muestreadas. Por otro lado el análisis factorial por componentes principales permitió reducir el conjunto de compuestos productos de pirólisis en dos variables sintéticas que explicaron el 51 de la variabilidad total. Aunque en todas las zonas se evidenció una MOS con un grado importante de descomposición, el factor 1 permitió separar entre MOS de origen microbiano relativamente descompuesta y MOS fresca o de descomposición lenta y de origen vegetal. En términos generales las zonas 1, 3 y 4 mostraron una contribución relativamente alta de MOS microbiana y en menor proporción de MOS de origen vegetal tanto para suelos de bosques como para suelos de cultivo, en contraste con las zonas 2, 5 y 6 que presentaron mayor proporción de MOS de origen vegetal, destacando la zona 6 donde se presentó evidencias que caracterizan al material quemado.

Palabras claves: Pirólisis, caracterización molecular de la MOS.

1. Introducción

Las zonas agrícolas en ambientes semiáridos constituyen ecosistemas particularmente frágiles, expuestos a permanentes riesgos de degradación de sus propiedades físicas, debidas principalmente a las bajas tasas de acumulación de materia orgánica y a su reducido período de transformación. Estudios recientes han establecido la importancia del análisis cualitativo de la materia orgánica para el reconocimiento de los cambios en las propiedades agrobiológicas del suelo. La caracterización molecular de la materia orgánica del suelo

(MOS) permite establecer descriptores de la calidad de la materia orgánica en términos que pueden ser relacionados con su resiliencia y sustentabilidad (López *et al.*, 2003).

La degradación de suelos y el descenso de la productividad real y potencial son algunos de los aspectos más importantes en la sostenibilidad agrícola. El manejo de las entradas orgánicas y de la (MOS), representa un componente crítico de la productividad de los agrosistemas de las regiones tropicales (Rodríguez *et al.*, 2004). Los usos de la tierra y las prácticas agrícolas afectan considerablemente el nivel de MOS (Kanchikerimath y Singh, 2001). La agricultura orgánica y los pastos han demostrado elevar el contenido de MOS, no así los usos convencionales que incluyen la perturbación del suelo (Pulleman *et al.*, 2000). En suelos arados, la MO es fuertemente alterada, lo que indica una rápida descomposición del material fresco. La tasa de pérdidas de MOS del suelo, por cambios en el uso de la tierra, depende de varios factores: intensidad de la labranza (Follett y Schimel, 1989), rotación y drenaje del suelo, así como la textura y fertilización (Gregorich *et al.*, 1996).

Sólo una proporción limitada del total de la materia orgánica del suelo (principalmente la de origen reciente) muestra una estructura química que puede ser asimilada a la de los constituyentes macromoleculares de la biomasa input (sobre todo vegetal y microbiana). Estas sustancias orgánicas (p. ej., celulosa y hemicelulosas, ligninas, cutinas y suberinas) experimentan alteraciones estructurales en los suelos tales como cambios en el contenido de grupos funcionales, condensación o despolimerización, o incorporación de productos derivados del metabolismo microbiano (p.ej. lípidos o proteínas). A pesar de que se considera que estos constituyentes de las plantas son rápidamente metabolizados y transformados en su mayor parte en CO₂ y H₂O (proceso de mineralización) también es posible que, sobre todo en determinados tipos de suelos en los que concurren factores ambientales o geológicos específicos, una proporción significativa de estas sustancias permanezcan estables durante un considerable periodo de tiempo como resultado de sus interacciones con otros componentes del suelo (Almendros, 2004).

La estructura macromolecular de la MOS y su insolubilidad exigen la utilización de métodos degradativos para realizar estudios a nivel molecular, en tal sentido existen diferentes técnicas para abordar este tipo de estudio (Hatcher *et al.*, 2001). La baja concentración en la muestra, la conformación de complejos organominerales, y el carácter heterogéneo y polidisperso de la MOS, han conducido a la extracción de las sustancias húmicas con bases fuertes y sales neutras, así como a la separación de los ácidos húmicos y fúlvicos; sin

embargo, el material sufre alteraciones en los procesos de extracción y purificación (Schulten y Leinweber, 1993). De la misma forma, no están suficientemente claras las relaciones entre las propiedades del material analizado y las características de importancia agronómica de los suelos (Rodríguez *et al.*, 2004).

De acuerdo con la revisión hecha por Saiz Jimenez (1994), la pirólisis acoplada a cromatografía de gases/ espectrometría de masas (P-CG/EM) fue utilizada por primera vez por Simmonds *et al.* (1969), en muestras superficiales de suelos del desierto de California con 0,34% de C, con la perspectiva de utilizar esta técnica para un ensayo biológico exploratorio en Marte, buscando moléculas orgánicas indicadoras de actividad biológica. Más tarde fue verificada la posibilidad de utilización de la técnica para estudios de materia orgánica del suelo y su impacto desde el punto de vista geoquímico, estructural y ecológico (Shulten, 1993). En suelos agrícolas, la P-CG/EM puede realizar rápidamente una discriminación de componentes orgánicos del suelo, mostrando una relevancia directa en la investigación edáfica (Canellas *et al.*, 2008).

La pirólisis CG/EM, permite la detección de un gran número de fragmentos orgánicos que pueden ser interpretados en términos de la composición química de las entradas (plantas), contribución microbiana, y la descomposición selectiva (Buurman *et al.*, 2007a). La pirólisis es la rotura de enlaces débiles, fragmentando la MOS en unidades de menor tamaño a través de la acción del calor, proceso que usualmente se hace al vacío, aplicando una corriente rápida de gas inerte que disminuye la formación de productos secundarios. La absorción de la energía térmica causa excitación en los enlaces de modo vibracional produciendo una descomposición de los enlaces débiles. El número y variedad de productos formados usando esta técnica para estudiar las sustancias húmicas es muy grande, por lo que es necesario aplicar la cromatografía de gases acoplada a la espectroscopía de masas para separar e identificar los productos de la reacción (Swift, 2006). La P-CG/EM, es una técnica adecuada para el estudio de la naturaleza química de las distintas fracciones de la materia orgánica del suelo, se identifican polímeros como polisacáridos, polipéptidos y ligninas incorporadas dentro de una estructura; las estructuras de los productos de pirólisis encontradas en los ácidos húmicos son las mismas observadas en muestras más o menos puras de ligninas y polisacáridos, los resultados obtenidos mediante pirólisis, degradaciones químicas y resonancia magnética nuclear coinciden, lo que demuestra que la pirólisis es una técnica

analítica útil, de una relativa rapidez, con amplia aplicación, permitiendo caracterizar la MO asociada con los procesos de formación y prácticas de manejo de los suelos (Loteró, 2012).

Estudios recientes en el departamento de Magdalena (Colombia) (IGAC, 2009) evidencian el deterioro en los contenidos de la MOS, entre otros aspectos por el efecto del cambio del uso del suelo y el conflicto de uso en los mismos; en tal sentido han surgido un sin número de investigaciones que dan cuenta de la disminución en los contenidos de la MO en suelos cultivados, pero dado que la cantidad y calidad de la MOS no están necesariamente correlacionadas, surge el interés por avanzar en su caracterización a nivel cualitativo y conocer en qué medida esta MO de los suelos agrícolas está asociada a la fracción mineral estableciendo su composición molecular en comparación con los ecosistemas naturales o seminaturales, por ello es indispensable profundizar en el estudio de los constituyentes moleculares de la MOS. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar por pirólisis la composición molecular de la MO en suelos cultivados y de bosques muestreados en 6 zonas del clima cálido tropical en el departamento de Magdalena (Colombia).

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción de los sitios de muestreo

Los aspectos generales del muestreo y las características edafoclimáticas de las zonas se desarrollaron en el capítulo 2. No obstante a continuación se detallan algunos aspectos particulares importantes en la discusión de los resultados:

Aunque los sitios de cultivados en cada zona tienen distintos tipos de cultivos y los suelos bajo vegetación natural están cubiertos por los diferentes tipos bosques, esperamos que la gestión agronómica (perturbación) y las condiciones edafoclimáticas sean el principal factor que influye en la composición de la MOS. Para interpretar la composición molecular de la MOS en relación al cultivo, la vegetación original, los diferentes bosques y las prácticas agronómicas implementadas, se describen en la Tabla 1 algunos aspectos importantes para cada zona.

La acción antrópica sobre los bosques primarios en el departamento del Magdalena ha sido devastadora, desapareciendo la mayoría de las formaciones vegetales nativas y quedando mayoritariamente formaciones vegetales con carácter de bosques secundarios (IGAC, 2009). En tal sentido para el presente estudio se muestrearon suelos en las siguientes áreas de

formación vegetal secundarias conocidas dentro de la clasificación de zonas de vida de Holdridge como:

Tabla 70. Descripción de las zonas de muestreo.

ZONAS	MUESTRAS	USO DEL SUELO	CLIMA	CLASIFICACIÓN	PAISAJE Y MATERIAL PARENTAL
1	1	Cultivo de Café con sombrío.	Cálido Húmedo; Altitud 956 msnm; Precip. 2000 mm; Tem 24°C	Typic Eutrodepts Údico Isohipertérmico Cambisol háplico	Paisaje de Montaña; Ladera; MP: esquistos
	2	Bosque húmedo tropical			
2	3	Cultivado hace más de 20 años con Palma Africana, actualmente se le dá un manejo orgánico al cultivo y se alterna con leguminosas como cobertura para el suelo.	Cálido seco; Altitud 42msnm; Precip. 1200 mm; Tem 28.4°C	Typic Ustifluvents Ústico Isohipertérmico Fluvisol háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales
	4	Bosque seco tropical secundario			
3	5	Suelo arado al momento del muestreo para la siembra de banano, anteriormente sembrado con arroz.	Cálido seco; Altitud 5 msnm; Precip. 1245 mm; Tem 27°C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: depósitos clásticos
	6	Bosque seco tropical			
4	7	Cultivo de Banano tradicional, anteriormente bosque seco tropical	Cálido seco; Altitud 15 msnm; Precip. 750 mm; Tem 27.5 °C	Typic Haplusteps Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales medios
	8	Cultivado de Mango hace más de 15 años.			
	9	Bosque seco tropical secundario			
5	10	Cultivado con frutales de clima cálido.	Cálido muy seco; Altitud 10 msnm; Precip. 880 mm; Tem 30 °C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinós
	11	Bosque muy seco tropical			
6	12	Cultivado de hortalizas de clima cálido, anteriormente sembrados de Maíz.	Cálido muy seco; Altitud 7 msnm; Precip. 663 mm; Tem 29°C	Typic Ustipsamments Ústico Isohipertérmico Arenosol háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinós
	13	Bosque muy seco tropical			

Bosque húmedo tropical. Esta formación vegetal se desarrolla en la Sierra Nevada de Santa Marta desde los 900 hasta los 2500 m.s.n.m y corresponde en Colombia al llamado cinturón cafetero con temperaturas medias anuales entre los 17 y 24°C y precipitaciones entre 2000 y 4000 mm de media anual, el bosque húmedo en su estado original alrededor de 20 años, es un bosque alto siempre verde con algunas epifitas y quiches sobre las ramas (IGAC, 2009). Ver especies en la Tabla 1 capítulo 2.

Bosque seco tropical. La sequía en estas zonas es debida a la acción de los vientos alisios de este-noreste (que soplan durante los meses de diciembre hasta junio). Esta formación vegetal se desarrolla desde los 0 hasta los 1000 m.s.n.m y corresponde a la zona agrícola y ganadera más importante en Colombia, con temperaturas medias anuales superiores

a 24°C y precipitaciones entre 1000 y 2000 mm de media anual (IGAC, 2009). Ver especies en las Tablas 3, 5 y 7 del capítulo 2.

Bosque muy seco tropical. Como límites climáticos presenta una temperatura superior a 24°C y promedios de lluvia que oscilan entre 500 a 1000 mm anuales. Se presentan dos épocas definidas: un período seco que se inicia en diciembre y termina en abril y otro período lluvioso que va de mayo a noviembre con una pequeña estación seca en el mes de julio. Durante el período de sequía en la costa Caribe, la mayoría de los árboles y arbustos de esta formación pierden el follaje (IGAC, 2009). Ver especies en las Tablas 9 y 11 del capítulo 2.

Se muestrearon suelos en áreas de cultivos con mayor importancia económica del departamento del Magdalena. En la zona 1 suelos bajo cultivo de café (*Coffea arabica*) hace más de 50 años, sembrado bajo sombrero con árboles de la especie *Cordia alliodora*, *Inga edulis* y *Erythrina fusca*, entre otros. En zona 2, palma africana (*Elaeis guineensis*) cultivado por más de 40 años con manejo de agricultura convencional, en la actualidad se da un manejo orgánico al cultivo que implica un alto retorno de residuos de cosecha a los suelos y el manejo de una cobertura vegetal con especies leguminosas. zona 3, suelos tradicionalmente sembrados en arroz (*Oriza sativa*) y al momento del muestreo recién arados para la siembra de banano orgánico (*Musa* sp.). zona 4, donde se muestrearon suelos cultivados con Mango (*Mangífera indica*) y banano con manejo convencional hace más de 50 años. Zona 5, cultivos de frutales de clima cálido como papaya (*Carica papaya*), naranjos (*Citrus sinensis*), y plátano (*Musa paradisiaca*); estos suelos hace 20 años estaban dedicados a la siembra de Algodón (*Gossypium hirsutum*) y a la ganadería. Zona 6, suelos dedicados a la siembra de hortalizas de clima cálido y hace más de 10 años sembrados en Maíz (*Zea mayz*), Sorgo (*Sorghum bicolor*) y Yuca (*Manihot esculenta*).

Extracción y purificación de la MOS.

Para el análisis de pirólisis se trabajaron 13 muestras (Tabla 1), de cada una se tomaron 5 gramos de suelo seco al aire y se atacaron con HCl 1M, para eliminar posible presencia de carbonatos; luego se añadieron 50 ml de NaOH 0.1M dejando agitar por 24 horas bajo una atmósfera de N₂ para evitar la oxidación. La suspensión fue centrifugada a 1800 g por una hora y dejando decantar; al residuo sólido obtenido producto de la decantación se le agregaron nuevamente 50 ml de NaOH 0,1M para luego mezclar los extractos correspondientes a una misma muestra. Los extractos fueron acidificados a pH 1 con HCl

concentrado para protonar la MOS, también se añadió 1 ml de HF concentrado, para romper los silicatos en el extracto, se dejó agitar por 48 horas para luego eliminar las sales mediante diálisis con membranas de tamaño de poros entre 6000-8000 Daltons. Finalmente las extracciones fueron congeladas y posteriormente liofilizadas para su respectivo análisis.

Pirólisis CG/EM.

Las muestras fueron analizadas con un pirolizador 5000 (Chemical Data Systems, Oxford, EE.UU.), junto a una 6890N GC y el MSD 5975B GC/MS de Agilent Technologies (Palo Alto, EE.UU.). Aproximadamente 1 mg de cada muestra fue introducido en un tubo de cuarzo con lana de vidrio en ambos lados. Se pirolizaron a 650 °C durante 2 s (velocidad de calentamiento 10 °C ms⁻¹). Sin embargo, los tubos de cuarzo atenúan parte del calor aplicado a la muestra (Biagini *et al.*, 2006). La línea de transferencia de CG/EM estaba a 270 °C, la fuente de iones (EI 70 eV) a 230 °C y el detector cuadrúpolo a 150 °C. El CG utilizado estaba equipado con una columna de 5 % fenil- 95 % dimetilpolisiloxano (longitud 30 m, diámetro interno 0,25 mm ; espesor de película 0,25 µm; HP-5MS). Se utilizó helio como gas portador (flujo constante, 1 ml min⁻¹); el programa de temperatura del horno fue de 50 °C a 320 °C (mantenido 5 min) a 15 °C min⁻¹.

Los productos de pirólisis se identificaron utilizando la biblioteca NIST '05 y experiencia previa; la cuantificación se basó en el área del pico de uno o dos iones característicos (valores *m/z*) de cada producto de pirólisis. Para cada muestra, la suma de las áreas de los picos cuantificados fue del 100 % y las cantidades se calcularon en relación a este. De acuerdo con el origen probable y la similitud, los productos de la pirólisis se agruparon de la siguiente manera: alifáticos (incluyendo alcanos, alquenos, pristeno, ácidos grasos y metil ésteres), aromáticos, poliaromáticos, compuestos con nitrógeno, ligninas, fenoles, polisacáridos y compuestos no identificados.

2.2. Análisis estadístico

Para cada grupo producto de pirólisis se realizó un ANOVA con arreglo factorial de dos factores: usos del suelo con dos niveles cultivo y bosque y zonas de muestreo con seis niveles, para establecer posibles diferencias estadísticas entre zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción.

Se realizó un análisis factorial por componentes principales con las proporciones relativas de los productos de pirólisis usando el software Statistica Version 6 (Statsoft, Tulsa, EE.UU). Para el análisis factorial de los datos se excluyó la muestra 4 (zona 2, uso bosque). Se retuvieron 11 factores con valores propios mayores que 1 y solo se tuvieron en cuenta para la interpretación de los resultados los 2 primeros factores que explicaron un 50.7 % de la varianza total.

3. Resultados y Discusión

3.1. Compuestos Identificados

Un total de 110 productos de pirólisis fueron utilizados en la cuantificación; en la Tabla 2, se pueden observar los valores medios y desviaciones estándar correspondientes. Los compuestos fueron agrupados acorde a su similitud química en: Alifáticos, Aromáticos, Poliaromáticos, Ligninas, Compuestos Nitrogenados, Fenoles, Polisacáridos y otros no identificados.

La abundancia de los grupos productos de la pirólisis se indican en la Tabla 3, para suelos de cultivos y bosques. La notable abundancia de compuestos nitrogenados (de origen microbiano), en combinación con la poca abundancia de ligninas (exclusivamente de origen vegetal) indican un alto grado de descomposición de la MO tanto para suelos de bosques, como para suelos de cultivo (Schellekens *et al.*, 2013). A continuación se explica con mayor detalle los grupos productos de pirólisis encontrados.

Alifáticos. Cuarenta y cuatro compuestos alifáticos fueron identificados, 21 *n*-alcanos con cadena entre C₁₂ y C₂₉, 17 *n*-alquenos entre C₁₂ y C₂₈, un C₁₆-ácido graso, un metil éster, un pristeno y tres compuestos alifáticos desconocidos. A pesar de haber identificado un número importantes de compuestos en este grupo, su abundancia relativa individual fue pequeña con porcentajes promedios menores de 0,52% para suelos de cultivo y de 0,45% para suelos de bosques, en tanto que la suma de los porcentajes promedios del grupo fue del 8% para suelos de cultivos y del 7,5% para suelos de bosques (Tabla 3); observándose el mayor valor en la zona 2 suelos de cultivo Palma Africana y el menor valor en la zona 3, suelo arado (Figura 1).

La poca abundancia de cadenas largas de alcanos y alquenos indica alta tasa de descomposición, baja tasa de retorno y compuestos derivados en su mayoría de

microorganismos en estos sistemas (Buurman *et al.*, 2011); cadenas cortas de compuestos alifáticos pueden ser de origen microbiano, ya sea fragmentos de lípidos o particiones de cadenas largas degradadas por microorganismos (Buurman *et al.*, 2006). Mayoritariamente alcanos y alquenos C₇₋₂₅ son productos de pirólisis derivados de biopolímeros tales como cutanes y suberinas (Tegelaar *et al.*, 1995).

Tabla 71. Principales productos de pirólisis de los suelos estudiados.

Componentes	CÓDIGOS	m/z ^a	RT min ^b	Promedio Cultivo	DS ^c (Cultivo)	Promedio Bosques	DS ^c (Bosques)
Poliaromáticos							
Naphthalene	PA1	128	9,556	0,37	0,10	0,35	0,20
Naphthalene, C1	PA2	142+141	10,647	0,31	0,07	0,32	0,13
Naphthalene, C1	PA3	142+141	10,793	0,25	0,04	0,26	0,09
Biphenyl	PA4	154	11,334	0,12	0,03	0,13	0,06
C2-Naphthalene	PA5	156+141	11,687	0,07	0,02	0,06	0,02
C3-Naphthalene	PA6	155+170	12,639	0,06	0,05	0,10	0,07
Fluorene	PA7	165+166	12,800	0,20	0,09	0,23	0,11
C3-Naphthalene	PA8	155+170	12,816	0,07	0,02	0,09	0,03
C4-Naphthalene?	PA9	169+184	13,689	0,10	0,03	0,09	0,03
Fenoles							
Phenol	Ph1	94+66	6,774	4,30	3,91	2,94	1,07
Phenol, C1	Ph2	107+108	8,011	0,62	0,26	0,45	0,13
Phenol, C1	Ph3	107+108	8,355	1,34	0,38	1,46	0,65
4-acetylphenol	Ph4	121+136	9,332	0,27	0,08	0,23	0,06
Polisacáridos							
Furan, 2-methyl-	Ps1	82+53	2,061	5,36	1,60	5,45	1,61
Acetic acid	Ps2	60	2,167	8,68	2,22	7,95	1,39
Furan, 2,5-dimethyl-	Ps3	96+95	2,633	0,85	0,23	1,13	0,27
3/2-Furaldehyde	Ps4	95+96	4,060	5,92	4,09	5,52	3,77
3-Methylfuran	Ps5	82+53	4,091	1,49	0,76	2,00	1,06
2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	Ps6	67+96	5,209	0,85	0,21	0,77	0,29
Furan, 2-ethyl-5-methyl-	Ps7	95+110	5,347	0,75	0,51	0,81	0,57
2-Furaldehyde, 5-methyl-	Ps8	110+109	6,288	2,77	1,54	2,75	1,46
Levogluosenone	Ps9	68+98	8,710	0,38	0,15	0,50	0,31
2-hydroxi-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	Ps10	112+55	7,533	0,06	0,13	0,11	0,22
Compuestos no identificados							
desconocido	unkn6	69+266	13,518	0,19	0,11	0,25	0,12
desconocido	unkn7	109+264	13,705	0,04	0,02	0,06	0,02

^a Usado para cuantificación. ^b Tiempo relativo de retención respecto a guayacol. ^c Desviación estándar.

Capítulo 6. Composición Molecular de la Materia Orgánica

Componentes	CÓDIGOS	m/z ^a	RT min ^b	Promedio Cultivo	DS ^c (Cultivo)	Promedio Bosques	DS ^c (Bosques)
Alifáticos							
n-Alcanos	C ₁₂ -C ₂₉	57+71	9.58-18.47	3,72	0,08	3,48	0,07
n-Alquenos	C ₁₂ -C ₂₈	55+69	9.50-18.129	2,93	0,08	2,55	0,05
Alifáticos	A11	57+71	9,743	0,10	0,06	0,12	0,02
Alifáticos	A12	69+55	10,996	0,18	0,12	0,22	0,09
Alifáticos	A13	57+71	11,068	0,07	0,02	0,07	0,02
Alifáticos	A14	55+56	11,750	0,20	0,06	0,13	0,02
Alifáticos	A15	57+71	11,796	0,11	0,02	0,13	0,02
Pristeno	A16	55+56	13,450	0,16	0,09	0,22	0,12
Alifáticos	A17	69+57	13,502	0,29	0,16	0,38	0,18
Ácidos grasos	F16	60+73	14,708	0,11	0,07	0,12	0,11
Metil ester	ME	74+87	14,495	0,12	0,08	0,09	0,02
Aromáticos							
Benzene	Ar1	78	2,375	2,58	0,57	2,48	1,07
Toluene	Ar2	91+92	3,226	11,55	1,59	12,98	4,14
C2 benzene	Ar3	91+106	4,440	0,76	0,23	0,89	0,35
C2 benzene	Ar4	91+106	4,567	0,93	0,30	1,11	0,36
styrene	Ar5	104+78	4,920	1,43	0,20	1,38	0,27
C2 benzene	Ar6	91+106	4,942	0,62	0,13	0,71	0,33
Propylbenzene	Ar7	91+120	5,958	0,28	0,08	0,28	0,09
Benzene, C3	Ar8	105+120	6,457	0,25	0,08	0,24	0,07
Indene	Ar9	115+116	7,627	0,61	0,12	0,55	0,19
Acetophenone	Ar10	105+77	8,048	0,39	0,22	0,33	0,12
1H-Indene, 3-methyl-	Ar12	115+130	9,124	0,23	0,05	0,22	0,06
Benzo-furan	Bf1	118+89	6,763	0,58	0,16	0,55	0,17
Benzo-furan, 2-methyl-	Bf2	131+132	8,602	0,40	0,17	0,32	0,20
Benzo-furan, C2?	Bf3	145+146	9,862	0,19	0,07	0,24	0,06
Dibenzo-furan	Bf4	168+139	12,405	0,11	0,04	0,10	0,08
Ligninas							
guaiacol	Lg1	109+124	8,396	0,36	0,40	0,32	0,23
Compuestos N							
1-ciclohexeneacetonitrile	N1	81+80	2,960	1,42	0,24	1,44	0,53
Pyridine	N2	79+52	3,046	10,00	1,32	9,90	1,45
Pyrrole	N3	67	3,140	3,31	1,05	3,95	0,78
Pyridine, 1-methyl-	N4	93+66	3,881	1,42	0,46	1,51	0,21
1H-Pyrrole, 2-methyl-	N5	80+81	4,198	1,11	0,59	1,40	0,59
1H-Pyrrole, 2-methyl-	N6	80+81	4,307	2,25	0,73	2,09	1,15
Pyridine, 2-methyl-	N7	93+66	4,598	1,83	0,37	1,96	0,12
5-methylpyrimidine	N8	94+80	5,573	0,44	0,55	0,41	0,31
Acetamide	N9	59	5,583	5,25	0,98	4,80	1,22
Pyridine, 2,3-dimethyl-	N10	106+107	5,713	0,46	0,21	0,43	0,03
Benzonitrile	N11	103+76	6,634	0,74	0,39	0,84	0,52
1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde, 1	N12	109+108	7,018	0,14	0,12	0,18	0,12
3-acetamido-4-pyrone	N13	111+153	8,136	0,05	0,02	0,04	0,02
x-methylbenzotrile	N14	117+90	9,072	1,05	0,13	0,95	0,14
Benzenepropanenitrile	N15	91+131	10,185	0,69	0,29	0,71	0,18
Indole	N16	117+90	10,731	0,73	0,30	0,74	0,18
Isoquinoline	N17	129	10,216	0,35	0,13	0,38	0,10
Diketodipyrrole	N18	186+93	13,601	2,57	0,65	2,72	0,55
alkylnitrile	N19	97+111	14,407	0,37	0,18	0,29	0,10
alkylnitrile	N20	97+111	15,400	0,23	0,10	0,18	0,06
2-pyrimidine-x-methyl	N21	108+107	3,982	0,34	0,09	0,32	0,08
Dimethylpyrimidine	N22	107	4,855	0,05	0,05	0,06	0,04
?	N23	111	6,571	0,07	0,04	0,07	0,02
Imidazole, 2-acetamido-5-methyl	N24	97+139	6,623	0,13	0,03	0,11	0,03
?Benzoxazole, 2-methyl-	N25	133	8,802	0,11	0,06	0,16	0,03

^aUsado para cuantificación. ^b Tiempo relativo de retención respecto a guayacol. ^c Desviación estándar.

Tabla 72. Promedios de los porcentajes relativos de los productos de pirólisis por usos del suelo.

Compuestos	Cultivo		Bosque	
	% Suma promedio	DS	% Suma promedio	DS
Compuestos N.	34,77	3,62	35,5	1,85
Polisacáridos	27,12	6,92	27,0	8,96
Aromáticos	20,92	2,85	22,4	6,63
Alifáticos	8,01	1,47	7,5	1,26
Fenoles	6,53	4,39	5,1	1,62
Poliaromáticos	1,56	0,33	1,6	0,59
Ligninas	0,36	0,40	0,3	0,23
Otros	0,23	0,13	0,3	0,13

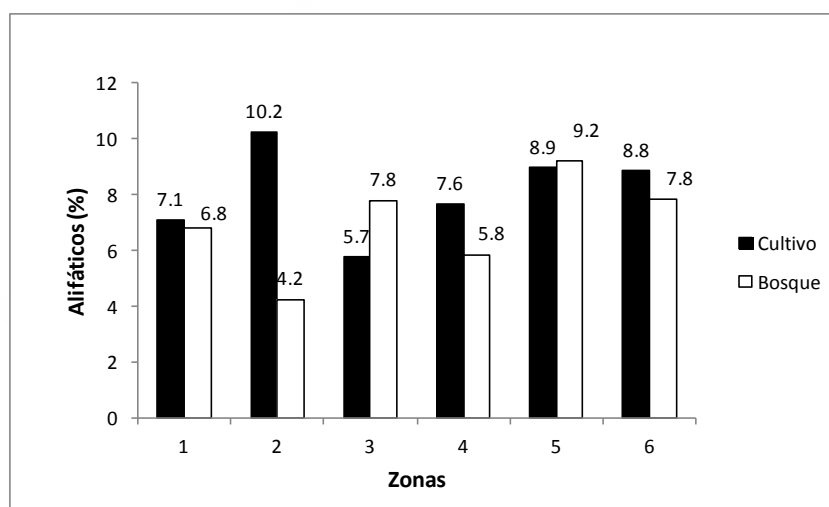


Figura 38. Proporción relativa de compuestos alifáticos por zonas.

Aromáticos. En este grupo se cuantificaron 15 productos de pirólisis; la suma de los porcentajes relativos promedios del grupo fue de 20,92% para suelos de cultivos y de 22,4% para suelos de bosques (Tabla 3); con el mayor valor en la zona 6 suelo de bosque muy seco tropical y el menor valor en la zona 1, suelos cultivados en café y bosque húmedo tropical (Figura 2); siendo el tolueno y benceno los productos de pirólisis más abundantes (11,55 % y 2,58% para suelos de cultivo y de 12,98% y 2,48% para suelos de bosques respectivamente). Cuando tolueno y piridina son encontrados simultáneamente, como se presentan en las muestras del presente estudio, los compuestos aromáticos son atribuidos en gran parte a las proteínas (Chiavari & Galleti, 1992, citados por Buurman & Roscoe 2011) y específicamente de origen microbiano; mientras que una combinación de tolueno y poliaromáticos indica la presencia de material carbonizado (Kaal *et al.*, 2008).

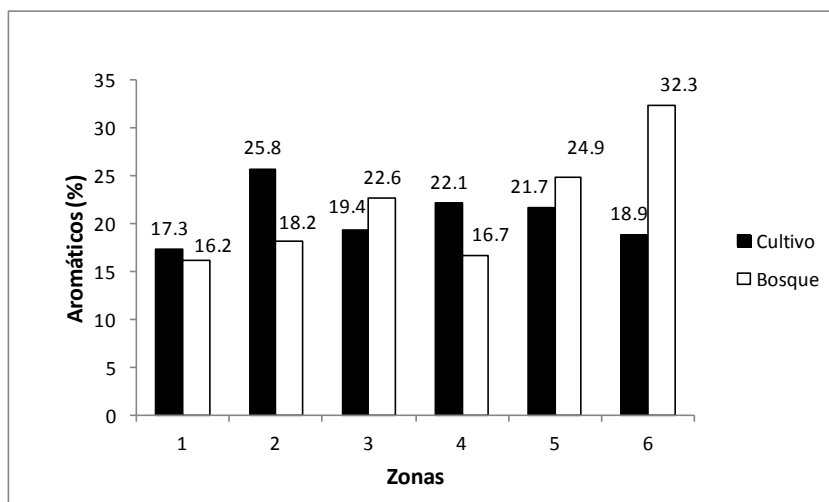


Figura 39. Proporción relativa de compuestos alifáticos por zonas.

Poliaromáticos. Fueron escasos en el extracto, mayoritariamente compuestos de naftaleno. Se identificaron solo 9 productos de pirólisis en este grupo, con poca abundancia relativa, valores menores de 0,37% y 0,35% para suelos de cultivo y bosques respectivamente; la suma de los porcentajes relativos promedios del grupo fue de 1,56% para suelos de cultivos y de 1,6% para suelos de bosques. (Tabla 3); los valores extremos coinciden con las zonas 6 y 1 referenciadas para el grupo de compuestos aromáticos (Figura 3). Los compuestos poliaromáticos hoy día se muestran como artefactos producto de la pirólisis de compuestos alifáticos (ácidos grasos; Almendros, 2008). Con frecuencia los compuestos poliaromáticos se generan por la combustión incompleta de material vegetal, como producto de incendios o quemas controladas en áreas cultivadas (Suess, 1976; Kaal et al., 2009, Buurman & Roscoe, 2011); excepto por el naftaleno ellos están prácticamente ausentes en suelos que no observan evidencias de quemas o incendios.

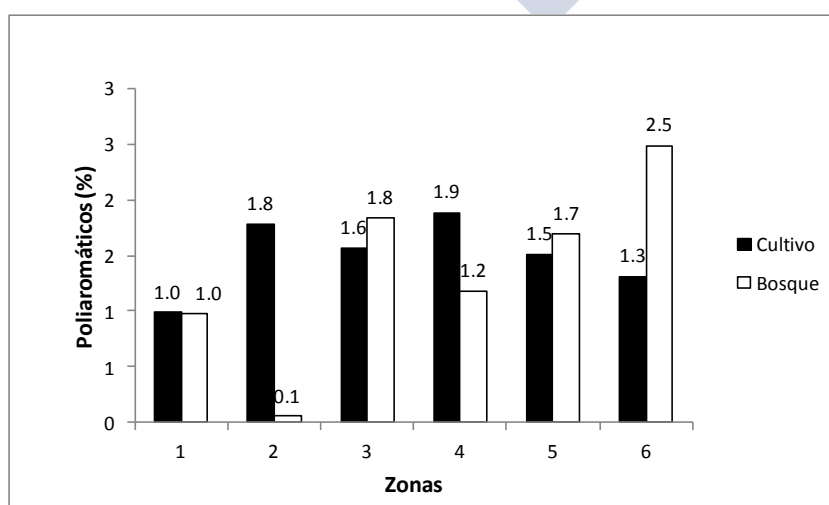


Figura 40. Proporción relativa de compuestos poliaromáticos por zonas.

Ligninas. Sólo se identificó un compuesto del tipo guaiacil, con una pequeña abundancia relativa para suelos de cultivo y bosques respectivamente (Figura 4), no obstante la poca abundancia, podemos destacar la mayor proporción 1,12% en el suelos de cultivo de palma africana (*Elaeis guineensis Jacq.*) de la zona 2, influenciado posiblemente por el elevado retorno de los residuos de cosecha, como práctica agronómica implementada en este cultivo y a la composición intrínseca de los residuos de la especie vegetal perteneciente a la familia botánica de las palmas en general (*arecaceae*). Un aumento de compuestos fenólicos con sustituyentes metoxilo característicos de las unidades constitutivas de las ligninas, es propio de una materia orgánica menos transformada, originada por procesos de alteración de las mismas (López *et al.*, 2003). En la zona 1 se presentaron valores de 0,7% y 0,4% para suelos cultivados con Café y de bosque respectivamente; la práctica de sombrero en el cultivo del café sugiere un aporte adicional a las entradas de MO de origen vegetal, que sumado a los aportes inherentes al manejo del cultivo, las condiciones climáticas de altitud y temperatura y alta pluviosidad, pueden contribuir a la persistencia de material vegetal en estos suelos; en las zonas 4 y 5 y especialmente la zona 5 los valores en suelos de bosque superan a los de cultivo, evidenciando un mayor contenido de ligninas del tipo guaiacol en los tejidos envejecidos de las especies vegetales presentes en los bosques secos tropicales, frente a los tejidos suculentos de las especies cultivadas en estas zonas; de otra parte en la zona 6, la presencia de este grupo de compuestos es prácticamente nula evidenciando una MOS altamente descompuesta, producto de las condiciones climáticas típicas en la zona con una excasa precipitación anual (< 600 mm), altas temperaturas a lo largo del año (30 °C) y bajos contenidos de N en el suelo, acorde a los descrito por (Dorado *et al.*, 2001), quien afirma que los procesos de biodegradación de la lignina dependen del nivel de N en el suelo, de tal forma que su eficacia suele incrementarse en medios pobres en nitrógeno.

Después de los polisacáridos la lignina es el componente más abundante de la pared celular en plantas vasculares, musgos y helechos. Las principales unidades constituyentes de la lignina son alcoholes: cumarílico, coniferílico, sinapílico y cinamílico. (Thevenot *et al.*, 2010); la lignina aparece ligada al metabolismo de los compuestos nitrogenados, también se encuentra en la biomasa; su papel es doble: formar un entramado con la celulosa y hemicelulosa, protegiéndolas de los ataques enzimáticos, y proporcionar rigidez a los tejidos orgánicos (Blasco y Burbano, 2012).

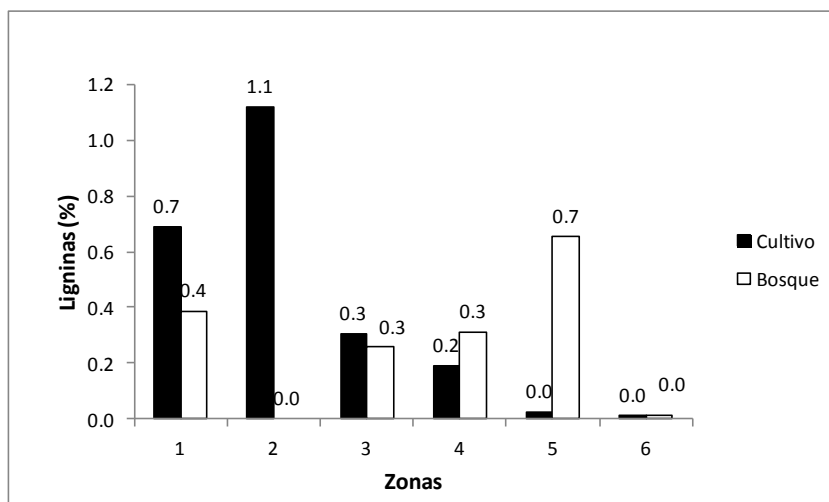


Figura 41. Proporción relativa de compuestos tipo ligninas por zonas.

Fenoles. Fueron cuantificados 4 compuestos fenólicos, un metoxifenol (ph1), y tres alkifenoles (ph 2-4) (Tabla 2); no obstante el pequeño número de compuestos de este grupo su contribución relativa fue entre 0,27-4,30 % y 0,23-2,94 % para suelos de cultivo y bosques respectivamente, la suma de los porcentajes relativos promedios del grupo fue de 6,53 % para suelos de cultivos y de 5,1 % para suelos de bosques; llama la atención la alta proporción relativa del compuesto ph1 (13,03%) en la muestra de cultivo de Palma Africana (*Elaeis guineensis Jacq.*) de la zona 2 del total de compuestos fenólicos (Figura 5), derivado posiblemente de proteínas debido al alto contenido de compuestos nitrogenados en esta zona.

En suelos, la principal fuente de fenoles son las proteínas (Van Heemst *et al.*, 1999), las ligninas y celulosas (Stuczynski *et al.*, 1997), situación que se pone de manifiesto al comparar las Figuras 4, 5 y 6 donde se puede predecir que las ligninas y los compuestos N, pueden ser la clave del origen de los compuestos fenólicos y específicamente en la zona 2 donde los fenoles se originan claramente de las ligninas. Se ha señalado al fenol como indicador de la degradación de la materia orgánica, debido a su asociación con las proteínas, sin embargo, la pirólisis de lignina y celulosa también genera fragmentos del tipo fenólico. Su baja abundancia relativa indicaría un decrecimiento en la mineralización de la materia orgánica por ausencia de material biodegradable. (Rodríguez *et al.*, 2004).

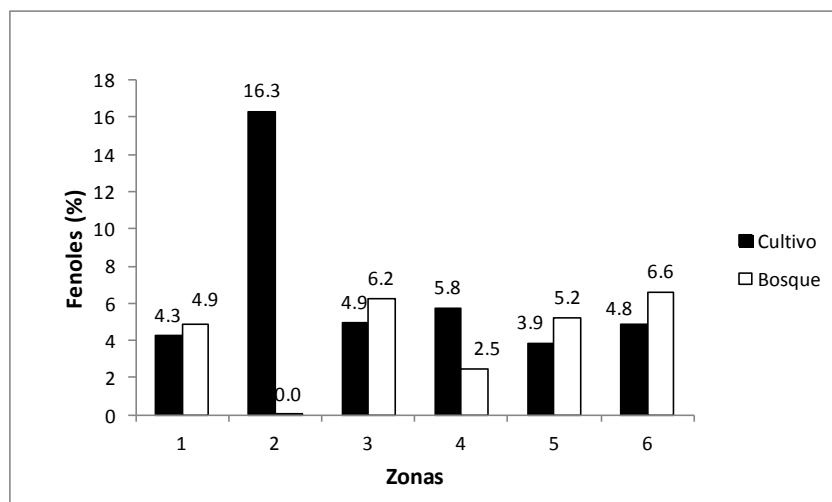


Figura 42. Proporción relativa de compuestos fenólicos por zonas.

Compuestos Nitrogenados. Fueron identificados 25 compuestos nitrogenados, con un amplio rango en el promedio individual de abundancia relativa entre 0,04 y 10 %, en relación al grupo, se presentó un promedio de abundancia relativa similar entre todas las zonas de 1,7%, tanto para suelos de bosque como para cultivos, los compuestos N presentaron los mayores valores en la suma de los porcentajes relativos promedios por grupo: de 34,77 % para suelos de cultivos y de 35,5 % para suelos de bosques y de comportamiento similar entre usos del suelo (Figura 6); no obstante como resultado del ANOVA, se presentaron diferencias estadísticas significativas entre zonas; para N3 (pirrol) la zona 3, N4,5 y 10 (metil- piridinas) la zona 2 y para N12 y N14 (benzonitrilos) la zona 1.

Los compuestos N, identificados por pirólisis, pueden originarse de residuos tanto de origen microbiano como vegetal, pero también pueden ser recién formados como producto de la pirólisis de aminoácidos y/o amino azúcares (Buurman *et al.*, 2007b). Las piridinas pueden formarse por la descomposición microbiana de ligninas o compuestos fenólicos de plantas en presencia de NH_3 ; la suma de piridinas y pirroles en el presente estudio, representó el 64% y 65% del grupo, para suelos de cultivos y bosques, respectivamente, muy probablemente de origen microbiano, pero también pueden ser potenciales productos de N recalcitrante; el diketodipirrol que en este estudio representó el 7,5 % y 7,8 % del porcentaje total del grupo, puede derivarse de fuentes microbianas ó con mayor frecuencia de vegetales; mientras que los índoles (2,12% del total) pueden ser mayoritariamente derivados de plantas (Suárez *et al.*, 2011); las acetamidas con un porcentaje del total del grupo de 15,2 % suelos de cultivo y 13,7%, suelos de bosque, son producto de la pirólisis de quitinas, que es un polímero de N-

acetilglucosamina, unidad básica de las paredes celulares de hongos y exoesqueletos de artrópodos, de fácil degradación (Stankiewicz *et al.*,1996).

Compuestos N en black carbon como benzonitrilo y metil-benzonitrilos con una abundancia relativa en el ensayo de 0,74% y 0,84% para suelos de cultivos y bosques respectivamente, con mayor presencia en suelos de bosque muy seco tropical de la zona 6, han sido relacionados recientemente como buenos indicadores de quemas (Suárez *et al.*, 2011).

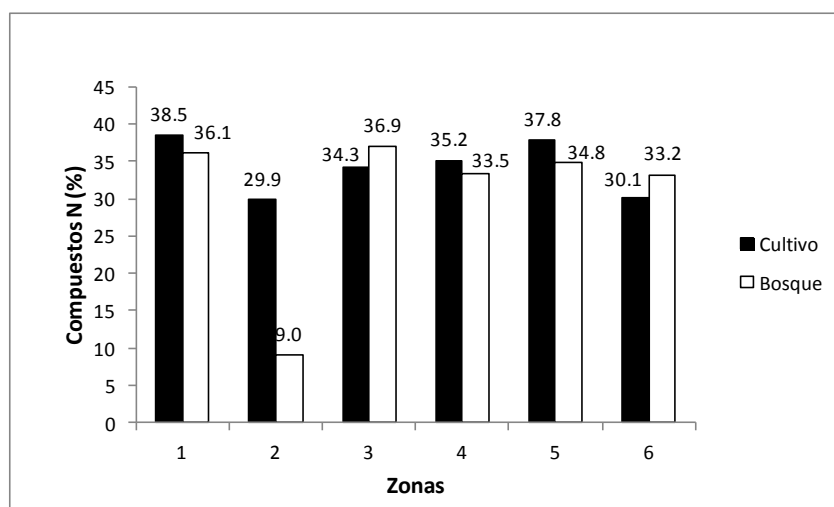


Figura 43. Proporción relativa de compuestos nitrogenados por zonas.

Polisacáridos. Este grupo fue representado por 10 compuestos, con la segunda mayor abundancia relativa después de los compuestos N (figura 8) con un 27,12 % y 27,0 % para suelos de cultivos y bosques respectivamente; el promedio de abundancia individual de compuestos osciló entre 0,12% (levoglucosan) y 9,66% (ácido acético) (Tabla 3). A partir del ANOVA se encontraron diferencias significativas entre zonas, para los compuestos Ps5, Ps7 (Furan, 2-ethyl-5-methyl-) y Ps8 (furaldehido); separándose claramente dos grupos, un primer grupo representado por los mayores promedios (zonas 1, 3 y 4) y un segundo grupo con las zonas 2, 5 y 6.

Los polisacáridos pueden ser de origen microbiano ó de plantas; los levoazúcares son usualmente atribuidos a material intacto de celulosa, pero no se detectaron en los suelos del presente estudio; mientras que furanos y furaldehidos (Ps 1,3,4,5,7 y 8) son comúnmente derivados de materia orgánica microbiana (Buurman & Roscoe, 2011). De acuerdo con algunos estudios, altas contribuciones de ácido acético (Ps 2), furanos, furanones,

furaldehidos, furanos metilados y acetilados en suelos podrían tener origen microbiano (Suárez et al., 2013).

Figura7. Proporción relativa de compuestos polisacáridos por zonas.

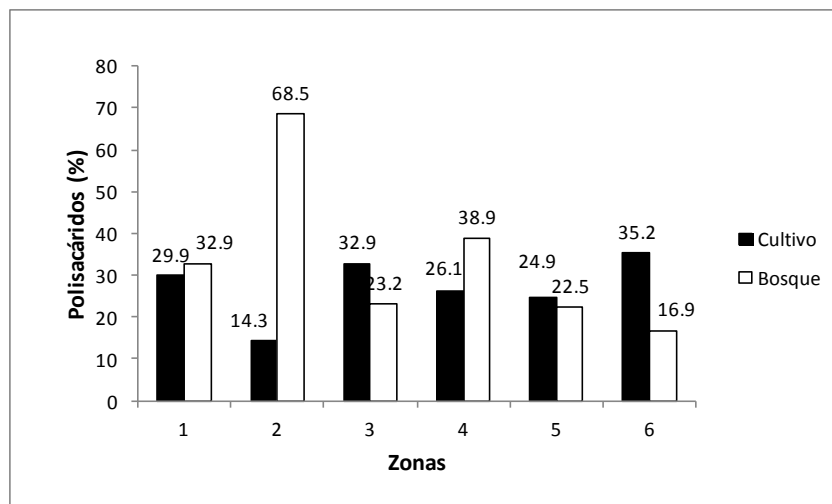


Figura 44. Proporción relativa de compuestos polisacáridos por zonas.

3.2. Análisis factorial.

Con el fin de reducir la dimensión de los datos, agrupando variables y facilitando la explicación de la variabilidad total en un pequeño conjunto de factores que controlan la naturaleza de las muestras, se aplicó un análisis factorial por componentes principales. En un primer análisis la muestra 4 perteneciente a la zona 2 suelo de bosque, observó cargas muy altas para fenol y guaiacol, desviándose notablemente del resto de muestras y determinando fuertemente las condiciones de los factores resultantes del análisis; por tanto la muestra 4 fue excluida para el análisis factorial definitivo. Once factores explicaron el 100% de la varianza total, solo los dos primeros factores F1 (32,7%) y F2 (18%), fueron considerados para la interpretación de los resultados, con una varianza acumulada del 50,7%.

En la Figura 8, se observa la ponderación del F1 y F2, vemos como cargas positivas del F1 explican mayoritariamente presencia de compuestos alifáticos, poliaromáticos, fenoles y lignina; cargas negativas del mismo factor: polisacáridos y abundancia de compuestos nitrogenados. Cargas positivas del F2, explican en mayor proporción la presencia de guaiacol, fenoles, pristene, metil ésteres y polisacáridos de origen vegetal; cargas negativas: poliaromáticos, benzofuranos, isoquinolina, benzonitrilo, benceno, alcanos de cadena corta y piridina. Aunque en todas las zonas se evidencia una MOS con cierto grado de

descomposición, el F1 separa entre MOS de origen microbiano relativamente descompuesta (cargas negativas) y MO relativamente fresca ó de difícil descomposición y origen vegetal.

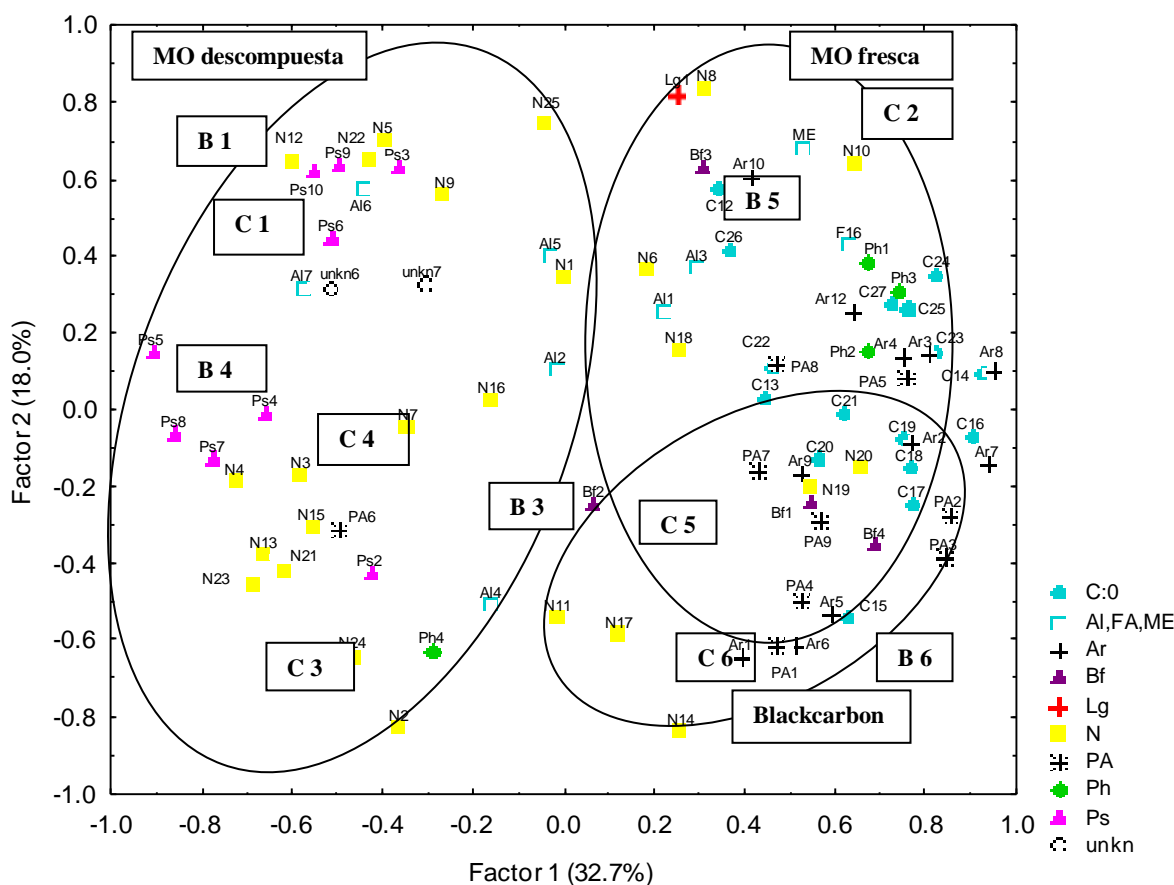


Figura 45. Análisis factorial de los productos de pirólisis. (B1= bosque, zona 1; C1=cultivo, zona 1), C:0= alcanos, AL= alifáticos, FA= ácidos grasos, ME= metil ésteres, Ar= aromáticos, Bf= benzofurano, Lg= lignina, N=nitrogenados, PA= poliaromáticos, Ph= fenoles, Ps= polisacáridos, Unkn= desconocidos.

En términos generales no se observan marcadas diferencias en la composición química de la MO entre suelos de bosques y suelos de cultivo para las puntuaciones de los factores 1 y 2, pero sí entre zonas de muestreo, lo que pone de manifiesto la influencia de las condiciones edafoclimáticas y las características del material vegetal propio de cada zona sobre la caracterización de la MOS; vemos entonces como en la zona 1, de mayor altura sobre el nivel del mar, mayor precipitación media anual, menor temperatura y ETP, régimen de humedad údico, cultivo café, y bosque húmedo tropical (Tabla 1), presenta una mayor cantidad de MO con alto índice de humificación a pesar de estar en la zona del F1 que caracteriza una MO de origen microbiano, su ubicación única en relación al F2 da cuenta de la presencia de un gran aporte de MO de origen vegetal; en relación a las zonas 3 y 4, suelo arado y cultivo banano respectivamente, presentan una MOS más descompuesta en relación a los suelos de la zona 1

derivado posiblemente de una tasa de mineralización más alta y menores entradas de MO, por las condiciones edafoclimáticas de éstas zonas.

Las zonas 5 y 6 podemos agruparlas en relación al factor 1, por el predominio de MO fresca o de difícil descomposición, cabe anotar que estas dos zonas coinciden las condiciones extremas de altas temperaturas, poca precipitación, prácticamente al nivel del mar, con proximidad a la costa, susceptibles de incendios, suelos con pH de tendencia alcalina, vegetación típica de bosques muy secos tropicales y cultivos de frutales y hortalizas adaptados a climas muy cálidos, que en general favorecen una alta tasa de mineralización, y bajísimos contenidos de MOS; como excepción se destaca la presencia de los suelos de cultivo con palma africana, en la zona 2, donde la naturaleza de la especie cultivada y el manejo agronómico dado al cultivo condiciona la presencia de MO de difícil descomposición y de origen vegetal con predominio de guaiacol, fenoles, metil ésteres y polisacáridos.

En términos generales las zonas 1, 3 y 4 mostraron una contribución relativamente alta de MO microbiana y en menor proporción MO de origen vegetal tanto para bosques como para cultivos, en contraste con las zonas 2, 5 y 6 que presentaron mayor proporción de MO vegetal (Figura 8); también se destaca que la composición de la MO en las zonas 3, 4, 5 y 6 (excepto por bosques 4 y 5) tienden hacia el punto que caracteriza al material quemado. (Figura 8).

4. Conclusiones

Para las condiciones del estudio, la caracterización molecular de la MOS, está más influenciada por las condiciones edafoclimáticas y el tipo de vegetación de cada zona que por la condición de uso del suelo cultivo o bosque; lo que sugeriría trabajos de esta naturaleza pero con más replicas de un mismo cultivo y tipo de bosque, en una determinada zona con condiciones edafoclimáticas relativamente homogéneas.

Aunque se presenta una MO con cierto grado de descomposición en todas las zonas, se pueden diferenciar tres grupos de zonas: un primer grupo con residuos de MO fresca o de difícil descomposición, principalmente de origen vegetal (C2, C5 y B5), un segundo grupo con MO altamente descompuesta con predominio de origen microbiano (C1, B1, C4, B4, C3, B3) y un tercer grupo con características que evidencian quemas en la zona muestreada (C6, B6).

En la zona 2 a excepción de las demás zonas, y específicamente en los suelos cultivados, la caracterización de la MO es condicionada por la naturaleza intrínseca de la MO de la especie vegetal cultivada (Palma Africana) y el sistema de gestión de los residuos vegetales de esta especie y en general el manejo agronómico dado al cultivo, favorecen la proporción relativa de compuestos Aromáticos presentes en la MOS.

Más del 50% de las proporciones relativas acumuladas de los productos de pirólisis determinados correspondieron a compuestos Nitrogenados y Aromáticos, con excepción de la muestra B2 ó muestra 4 correspondiente a suelos de bosque en la zona 2.

La mayor proporción relativa de compuestos nitrogenados se presentó en la zona 1(39.1 % para el suelo de cultivo y 37.1 % para el suelo de bosque; zona que presenta la mayor altitud sobre el nivel medio del mar, mayor precipitación, y menor temperatura en relación a las demás áreas muestreadas, facilitando una gran actividad microbiana y predominio de MO descompuesta, pero con un significativo origen vegetal.

Agradecimientos

Al Dr Joeri Kaal por su valioso apoyo en la dispendiosa labor de cuantificación e identificación, al Dr Manuel Suárez por sus sugerencias en la escritura de los resultados, al

profesor Peter Buurman por las observaciones realizadas y en especial a la compañera Judith Shellekens quien me acompañó a lo largo de todo el proceso.

5. Bibliografía

- Almendros, G. (2004). Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafologia*, Vol. 11(2), 229-248.
- Almendros, G. (2008). Humic acids. *En: Chesworth, W. (Ed), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, The Netherlands*, 315-323.
- Almendros, G., Guadalix, M. E., & Gonza'lez-Vila, F. (1996). Preservation of aliphatic macromolecules in soil humins. *Organic Geochemistry*, 24, 651-659.
- Biagini, E., Lippi, F., Tognotti, L., 2006. Characterization of a lab-scale platinum filament pyrolyzer for studying the fast devolatilization of solid fuels. *Fuel*, 85, 2408-2418.
- Blasco, M., & Burbano, H. (2012). La vida en el suelo. Notas sobre su bioquímica y microbiología. (En proceso de publicación).
- Brady, N., & Weil, R. (2002). *The nature and propiedades of soils*. (Vol. 13). New Jersey: Prentice-Hall.
- Buurman, P., Nierop, K. J., Pontevedra Pombal, X., & Martínez Cortizas, A. (2006). Molecular chemistry by pyrolysis-GC/MS of selected samples of the Penido Vello peat deposit, Galicia, NW Spain. *Peatlands, Evolution and Records of Environmental and Climate*(eds I.P. Martini, A.Martinez Cortizas & W.Chesworth), 217-240.
- Buurman, P., Petersen, F., & Almendros Martín, G. (s.f.). Soil organic matter chemistry in allophanic soils: a pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol Catena. *European Journal of Soil Science*, 58, 1330-1347.
- Buurman, P., & Roscoe, R. (2011). Different chemistry of free light and occluded light and extractable SOM fractions in soils of Cerrado, tilled and untilled fields, Minas Gerais, Brazil – a pyrolysis-GC/MS study. *European Journal of Soil Science*, 62, 253-266.
- Buurman, P., Schellekens, J., Fritze, H., & Nierop, K. (2007b). Selective depletion of organic matter in mottled podzols horizons. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 607-621.
- Chefetz, B., Tarchitzky, J., Desmukh, A. P., Hatcher, P. G., & Chen, Y. (2002). Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 129-141.
- Chiavari, G., & Galletti, G. C. (1992). Pyrolysis-gas chromatography massspectrometry of amino-acids. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 24, 123-137.
- Dorado, J., Field, J.A., Almendros, G., Sierra-Álvarez, R. (2001): Nitrogen removal with protease improves the selective delignification of hemp stemwood by the white rot fungus *Bjerkandera* sp. strain BOS55. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57, 205-211.

- Follett, R. F., & Schimel, D. S. (1989). Effects of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil Sci. Am. J*, 53, 1091-1096.
- Gregorich, E. G., Ellert, B. H., Drury, C. F., & Liang, B. C. (1996). Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residues C storage. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 60, 422-476.
- Hatcher, P., Dria, K., Kim, S., & Frazier, S. (2001). Modern analytical studies of humic substances. *Soil Science*, 166, 770-794.
- IGAC. (2009). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena. 496p.
- Kaal, J., Martínez Cortizas, A., & Nierop, K. J. (2009). Characterisation of aged charcoal using a coil probe pyrolysis-GC/MS method optimised for Black carbon. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 85, 408-416.
- Kaal, J., Martínez-Cortizas, A., & Nierop, K. J. (2008). Characterisation of aged charcoal using a coil probe pyrolysis-GC/MS method optimized for black carbon. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 85, 408-416.
- Kanchikerimath, M., & Singh, D. (2001). Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a cambisol in a semiarid region of India. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 86, 155.
- Killops, S., & Killops, V. (2005). *Introduction to Organic Geochemistry*. Malden, MA.: Blackwell Publishing.
- Knicker, H. (2007). How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 85, 91-118.
- López, F., Dorado, J., Gonzalez-Vila, F. J., Zancada, M. C., & Almendros, G. (2003). Evolución de las propiedades físicas y la materia orgánica del suelo con enmiendas orgánicas y fertilización mineral. *Edafología*, 10(2), 147-153.
- Lotero, M. (s.f.). Transformaciones del carbono orgánico presente en la vinaza aplicada a un suelo Vertic Haplustoll del valle del río Cauca. *Tesis doctoral- Universidad Nacional de Colombia sede Palmira*.
- Pulleman, M., Boeima, J., Van Essen, E., & Meijles, E. (2000). Soil organic matter content as a function of different land use history. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 64, 689-693.
- Rodríguez, B., España, M., & Cabrera, E. (2004). Propiedades químico estructurales de la materia orgánica del suelo en un agro-sistema de los llanos centrales de venezolanos bajo diferentes prácticas de manejo. *Interciencia*, 29(8), 461-467.
- Saiz Jiménez, C., & De Leeuw, J. W. (1986). Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *J. Anal. Appl. Pyrol*, 9, 99-119.

- Santos, G, Da Silva, L. Canellas, L, Camargo, F. Fundamentos da materia orgânica do solo. 2º edición 2008. Fundación Agrisus. 636p.
- Schellekens, J., Buurman, P., & Pontevedra-Pombal, X. (2009). Selecting parameters for the environmental interpretation of peat molecular chemistry – a pyrolysis-GC/MS study. *Organic Geochemistry*, 40, 678–691.
- Schellekens, J., Barberá, G.G., Buurman, P., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Jordà, G., (2013) Soil organic matter dynamics in Mediterranean A-horizons – the use of analytical pyrolysis to ascertain land use history. *J. Anal. Appl. Pyrol.* <http://dx.doi.org/10.1016/jaap.2013.07.004>.
- Schulten, H. R., & Schnitzer, M. (1998). The chemistry of soil organic nitrogen: a review. *Biology & Fertility of Soils*, 26, 1–15.
- Schulten, H., & Leinweber, P. (1993). Pyrolysis-field ionization mass spectrometry of agricultural soils and humic substances: Effect of cropping systems and influence of the mineral matrix. *Plant Soil*, 151, 77-90.
- Schulten, H. R., Plage, B., & Schnitzer, M. (1991). A chemical structure for humic substances. *Naturwissenschaften*, 78, 311-312.
- Stuczynski, T. I., McCarty, G. H., Reeves, J. B., & Wright, R. J. (1997). Use of pyrolysis GC/MS for assessing changes in soil organic matter quality. *Soil Science*, 162, 97–105.
- Suarez, M. (2013). Caracterización de la material orgánica del suelo y biogeoquímica de suelos de carga variable. *Tesis de Doctorado. Departamento de Edafología. USC.*, 226p.
- Suárez, M., Buurman, P., Camps, M., Kaal, J., Martínez, A., Gartzia, N., & Macias, F. Comparing NaOH-extractable organic matter of acid forest soils that differ in their pedogenic trends: a pyrolysis-GC/MS study. *European Journal of Soil Science*. 62, 834-848.
- Suess, M. J. (1976). The environmental load and cycle of polyaromatic hydrocarbons. *Science of the Total Environment*, 6, 239–250.
- Swift, R. S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci*, 166, 858-871.
- Tegelaar, E. W., de Leeuw, J. W., & Saiz-Jime´nez, C. (1989). Possible origin of aliphatic moieties in humic substances. *Science of the Total Environment*, 81/82, 1–17.
- Thevenot, M., Dignac, M. F., & Rumpel, C. (2010). Fate of lignins in soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 1200-1211.
- Van Heemst, J., Van Bergen, P. F., Stankiewicz De, B. A., & Leeuw, J. W. (1999). *Multiple sources of alkylphenols produced upon pyrolysis of DOM, POM and recent sediments*, 52, 239–256.





Capítulo 7. Conclusiones finales.



CONCLUSIONES FINALES

Las prácticas agronómicas de los diferentes cultivos de importancia económica al noreste del departamento del Magdalena afectan los contenidos y formas de Carbono de los suelos de esta región en relación a los suelos mantenidos con vegetación natural, perdiéndose entre un 14 y un 58,5 % del C total en los suelos cultivados con relación a los suelos de bosque. Por tanto, resulta de mucha relevancia la determinación de los mecanismos de estabilización de la MOS bajo las condiciones edafoclimáticas del estudio; en tal sentido se planteó como una primera parte de la investigación la revisión bibliográfica de los factores de formación potencialmente implicados en la génesis de los suelos de Colombia y, con mayor énfasis, a los suelos del departamento del Magdalena.

El clima puede considerarse como el factor formador con mayor influencia en la génesis de los suelos del departamento del Magdalena, por sí solo define diferencias marcadas entre ellos, condicionando el tipo, cantidad, distribuciones y relaciones tanto de vegetación como de organismos presentes. El clima predominante es el cálido seco, dando origen a la formación de bosque tropical seco, con escaso y fino follaje, lo que supone un reducido aporte de necromasa a los suelos. La temperatura ambiental del área de planicie es alta, superior a 28 °C y con escasa diferencia estacional, (régimen de temperatura isohipertérmico), lo cual influye en la actividad microbiana y por ende en la acumulación de materia orgánica del suelo. También actúa directamente en la velocidad con que se suceden las reacciones químicas del suelo y en la alteración física de los sedimentos depositados en toda la planicie, siendo la disponibilidad de agua el factor limitante de la misma durante la época seca del régimen ústico dominante en la zona.

Se han muestreado y analizado suelos con vegetación de bosque y cultivo en 6 zonas de la región noreste del departamento del Magdalena, desde el nivel del mar hasta los 956 m, con cambios de temperatura entre 24 y 30 °C y precipitaciones medias anuales que oscilan entre 663 y 2000 mm.

Los suelos estudiados presentaron en su mayoría reacción neutra o alcalina, bajo porcentaje de C total (entre 1,62 y 3,90 % en suelos de bosque y entre 1,28 y 2,61 % en suelos cultivados), con predominio de humus escasamente evolucionado de baja capacidad para la formación de complejos. De acuerdo a la caracterización mineralógica, los suelos tienen fertilidad moderada ya que la fracción gruesa presenta cantidades moderadas de feldespatos.

La fracción fina del suelo está integrada por proporciones bajas de haloisita y presencia significativa de micas (biotita). Puede afirmarse que los suelos estudiados son muy incipientes (Entisoles e Inceptisoles de la Soil Taxonomy y Fluvisoles y Cambisoles según el sistema de la WRB). Ni el Fe ni el Al representan ningún papel relevante en la floculación y metaestabilización de la materia orgánica, pues tanto los contenidos de especies iónicas y formas libres, como de las de bajo grado de orden y, sobre todo de las formas complejadas extraíbles con pirofosfato, son muy bajos. La escasa capacidad floculante de la materia orgánica debe atribuirse en exclusiva a los elementos alcalinotérreos (especialmente al Ca) y, en mucha menor medida, a las pequeñas cantidades de formas recalcitrantes del orden del 5 % representado por la relación C_{nox}/C_{total} . Por tanto es importante conseguir un incremento de las formas humificadas activas (C hidrolizables, extraíble con pirofosfato y formas fácilmente oxidables) así como del C recalcitrante (C no oxidable y difícilmente oxidable). Un modelo que se lleva a cabo actualmente en la zona puede ser la gestión del cultivo de palma africana, pero en esencia se requiere incrementar fuertemente la cantidad y estabilidad de la materia orgánica.

Las disoluciones de equilibrio de los suelos de la zona del Magdalena se caracterizan por ser bicarbonatadas cálcicas, ligeramente silícicas y ligeramente sódicas, correspondiendo a las zonas de suelos circum-neutros a calcáreos. La modelización termodinámica confirma que los suelos del Magdalena están muy poco meteorizados y presentan un bajo grado evolutivo. Las condiciones de los sistemas de alteración, con pH alto y escasa durabilidad de la presencia de agua, permiten la conservación durante más tiempo de los minerales de mayor labilidad. La tendencia de neoformación se dirige hacia la caolinita, como mineral termodinámicamente más estable, pero como la disolución está controlada por las formas de bajo grado de orden del hidróxido de Al y las actividades del Si y los cationes alcalinos son relativamente elevadas, pueden encontrarse y neoformarse en estos suelos incipientes otros minerales como gibbsita (bastante desfavorecida por las condiciones de sequía), formas de bajo grado de orden de los minerales del grupo de la caolinita e incluso minerales 2:1 en formas metaestables, mientras que la caolinita cristalina aparecería fundamentalmente en fases de evolución edáfica más avanzada.

La forma de Carbono oxidable representó el 95% del Carbono total de los suelos; presentándose un mayor porcentaje de C asociado a fracciones más estables ($C_{ox}-C_p$) en suelos de bosques (69%), frente a un (59%) en suelos cultivados; de igual manera en relación

a la forma de Carbono hidrolizable Ch que representó el 60% del Cox en suelos de cultivo y el 57% en suelos de bosques, podemos afirmar que éstos últimos poseen un mayor porcentaje de C asociado a formas de menor labilidad.

El sumidero de Carbono de los suelos del departamento del Magdalena representa para los suelos con vegetación natural cifras que van de 40 a 109 kg C ha⁻¹ y de 32 a 78 kg C ha⁻¹ en los suelos cultivados. El uso y manejo de los suelos cultivados comparados con los suelos de bosque, influye negativamente en los contenidos de las formas de Carbono más estables, presentándose en promedio pérdidas de Carbono total del orden del 26%.

La respiración del suelo está correlacionada positivamente con las formas del C estudiadas (Ct, Cox, Cp y Cdox) y existe una clara correspondencia entre la emisión de CO₂ y el grado de oxidabilidad de las formas de C. Sin embargo, se encontró que hay condiciones que limitan la actividad microbiana, probablemente, el alto pH, la sequía y, en menor medida, las limitaciones de nutrientes disponibles. Los suelos de bosques presentaron en promedio una mayor actividad microbiana por gramo de suelo, evidenciando tanto un mayor contenido de necromasa y una mayor diversidad biológica. En contraste, la tasa de emisión de CO₂ por gramo de C oxidable es mayor (como promedio) en los suelos de cultivo, lo que puede interpretarse teniendo en cuenta que hay menos C, pero de mayor labilidad y por el efecto inductor de mineralización de la materia orgánica que va asociado a las perturbaciones ligadas al laboreo, fertilización, etc. En tal sentido la respiración del suelo puede ser utilizada entre otros aspectos como un indicador sensible para evaluar la capacidad de fijación de Carbono de los suelos frente al cambio climático.

Para las condiciones del estudio, la caracterización molecular de la MOS, está más influenciada por las condiciones edafoclimáticas de cada zona (Precipitaciones de 2000 mm en las zonas altas a menos de 800 mm en el litoral) que por la condición de uso del suelo cultivo o bosque; lo que sugeriría trabajos de esta naturaleza pero con más replicas de un mismo cultivo y tipo de bosque, en una determinada zona con condiciones edafoclimáticas relativamente homogéneas.

Aunque se presenta una MOS con alto grado de descomposición en todas las zonas, se pueden diferenciar tres grupos de suelos con diferentes niveles de degradación: un primer grupo con residuos de MOS relativamente fresca, principalmente de origen vegetal, un segundo grupo con MOS altamente descompuesta con predominio de origen microbiano y un

tercer grupo con características que evidencian quemas en la zona muestreada, lo que puede explicar la presencia de las formas recalcitrantes.

En la zona 2 a excepción de las demás zonas, y específicamente en los suelos cultivados, las características de la MOS son condicionadas por la naturaleza intrínseca de la MO de la especie vegetal cultivada (Palma Africana).

Con excepción del sitio de bosque en la zona 2, más de la mitad ($58 \pm 6 \%$) de las proporciones relativas acumuladas de los productos de pirólisis determinados correspondieron a compuestos con N y marcadores de polisacáridos, representantes principales de la biomasa microbiana.

La mayor proporción relativa de compuestos con N se presentó en la zona 1, que presenta la mayor altitud sobre el nivel medio del mar, mayor precipitación, y menor temperatura en relación a las demás zonas, facilitando una gran actividad microbiana y predominio de MOS descompuesta, pero con un significativo origen vegetal.

Los residuos vegetales de la Palma Africana, y en general el manejo agronómico dado a su cultivo, favorecen la proporción relativa de compuestos aromáticos, lo que incrementa la estabilidad de la materia orgánica y la resistencia frente a la erosión.