

Prevención y Control de la Contaminación Ambiental

ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS
CAFETEROS (ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES) EN ANOLAIMA,
CUNDINAMARCA

JOHANA CABALLERO VANEGAS Cód. 064091055

KAREN MEJIA ZAMBRANO Cód. 064082041

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Directora: Lizeth Manuela Avellaneda Torres

Química. MSc.PhD Agroecología

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Ambiental

2015

Declaratoria de originalidad:

“La presente propuesta de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. La propuesta de tesis es resultado de las investigaciones del autor (es), excepto donde se indican las fuentes de Información consultadas”.



Johana Caballero Vanegas
Cod.064091055



Karen Mejía Zambrano
Cód. 064082041

TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	8
2. JUSTIFICACIÓN	10
3. OBJETIVOS	12
3.1. OBJETIVO GENERAL	12
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4. MARCO REFERENCIAL	13
4.1. MARCO TEÓRICO	13
4.1.1. AGRICULTURA CONVENCIONAL, AGRICULTURA ORGÁNICA Y AGRICULTURA ECOLÓGICA	14
4.1.2. AGROECOLOGÍA	16
4.1.3. SISTEMAS CAFETEROS	17
4.1.4. CALIDAD DEL SUELO	19
4.1.5. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS	22
4.1.5.1. UREASA	23
4.1.5.2. PROTEASA	23
4.1.5.3. FOSFATASA ÁCIDA Y ALCALINA	24
4.1.5.4. β-GLUCOSIDASA	26
4.6. CAMBIO CLIMÁTICO	26
4.2. MARCO GEOGRÁFICO	28
4.3. MARCO LEGAL	29
5. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR	31
5.1. HIPÓTESIS CENTRAL	31
5.2. MATERIAL BIOLÓGICO DE TRABAJO	31
5.3. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS ASOCIADAS A EL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL NITRÓGENO.....	33
5.4. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS RELACIONADAS CON EL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL FÓSFORO.....	35
5.5. ANÁLISIS DE ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE AL MENOS UNA ENZIMA INDICADORA DEL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CARBONO.....	36
5.6. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS, LOS PARÁMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS Y LAS	

CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS Y CULTURALES QUE DETERMINAN LA RESILIENCIA DE LOS AGROECOSISTEMAS.	37
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
6.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS AGROECOSISTEMAS EN ESTUDIO	40
6.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	42
6.1.2. % HUMEDAD.....	43
6.1.3. DENSIDAD APARENTE.....	44
6.1.4. ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	46
6.1.5. CARBONO ORGÁNICO.....	47
6.1.6. NITRÓGENO TOTAL.....	49
6.1.7. Boro.....	51
6.1.8. pH.....	52
6.1.9. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC).....	54
6.1.10. BASES INTERCAMBIABLES.....	56
6.1.10.1. CALCIO (Ca).....	56
6.1.10.2. POTASIO (K).....	58
6.1.10.3. MAGNESIO.....	59
6.1.10.4. SODIO (Na).....	61
6.1.11. FÓSFORO.....	62
6.1.12. ELEMENTOS MENORES.....	63
6.2. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS DE LOS SUELOS EN ESTUDIO	65
6.2.1. UREASA.....	66
6.2.2. PROTEASA.....	68
6.2.3. FOSFATASA ÁCIDA.....	69
6.2.4. FOSFATASA ALCALINA.....	72
6.2.5. β-GLUCOSIDASA.....	74
6.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS POR ÉPOCA Y MANEJO.....	76
6.4. ESCALAMIENTO NO MÉTRICO MULTIDIMENSIONAL (MDS) ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS POR ÉPOCA Y MANEJO.....	78
6.5. ANÁLISIS CANÓNICO DE COORDENADAS PRINCIPALES CAP ÉPOCA - MANEJO - PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	79

Figura No 23: Análisis CAP correlación de actividades enzimáticas y parámetros físicoquímicos por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca)	80
7. CONCLUSIONES.....	84
8. RECOMENDACIONES	87
9. BIBLIOGRAFÍA.....	88
Anexo No 1.....	106

INDICE DE TABLAS

Tabla No 1: Nominación de los agroecosistemas ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).....	33
Tabla No 2: Determinación de parámetros físico- químicos.....	38
Tabla No 3: Resumen evaluación de resiliencia de fincas ecológicas y convencionales en Anolaima, Cundinamarca.	39
Tabla No 4: Promedio de parámetros físicos de suelos evaluados en agroecosistemas ecológicos y convencionales de Anolaima, Cundinamarca.	41
Tabla No 5: Promedio de parámetros fisicoquímicos de suelos evaluados en agroecosistemas ecológicos y convencionales de Anolaima, Cundinamarca.	41
Tabla No 6: Promedio de parámetros químicos bases intercambiables de suelos evaluados en agroecosistemas ecológicos y convencionales de Anolaima, Cundinamarca.	42
Tabla No 7: Promedio de parámetros químicos elementos menores de suelos evaluados en agroecosistemas ecológicos y convencionales de Anolaima, Cundinamarca.	42
Tabla No 8: Promedio de actividades enzimáticas de suelos evaluados en agroecosistemas ecológicos y convencionales de Anolaima, Cundinamarca.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No 1: Localización del área de estudio.....	28
Figura No 2: Análisis granulométrico en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	43
Figura No 3: Humedad gravimétrica en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	44
Figura No 4: Densidad Aparente en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	46
Figura No 5: Índice de plasticidad en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	47
Figura No 6: CO (%) suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	49
Figura No 7: N (%) en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	51
Figura No 8: N (%) en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	52
Figura No 9: N (%) en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	54
Figura No 10: CIC en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	55
Figura No 11: Ca en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	57

Figura No 12: K en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	58
Figura No 13: Mg en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	60
Figura No 14: Na en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	61
Figura No 15: P en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	63
Figura No 16: Actividad ureasa en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	67
Figura No 17: Actividad Proteasa en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	69
Figura No 18: Actividad fosfatasa acida en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	71
Figura No 19: Actividad fosfatasa alcalina en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	73
Figura No 20: Actividad β - glucosidasa en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	75
Figura No 21: Análisis ACP correlación de actividades enzimáticas por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	¡Error! Marcador no definido.
Figura No 22: Análisis MDS actividades enzimáticas por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).	¡Error! Marcador no definido.

Figura No 23: Análisis CAP correlación de actividades enzimáticas y parámetros fisicoquímicos por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca). ...**¡Error! Marcador no definido.**

Figura No 24: Análisis CAP correlación de actividades enzimáticas y puntuaciones de resiliencia por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca). 83

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La agricultura convencional tiene como objetivos principales, la maximización de la producción y de las ganancias, por medio de prácticas como: labranza intensiva, monocultivo, irrigación intensiva, aplicación de fertilizantes inorgánicos, control químico de plagas y manipulación genética de los cultivos (Gliessman, 2002). Estas prácticas generan impactos en la calidad del agua, reducen la fertilidad del suelo, favorecen la pérdida de materia orgánica y los procesos erosivos, además aumentan el CO₂ atmosférico, contribuyendo de esta manera al calentamiento global, debido a los niveles elevados de gases asociados al efecto invernadero y las alteraciones en los ciclos hidrológicos (Cerón y Melgarejo, 2005). Como respuesta a la degradación de los recursos naturales asociados a la agricultura moderna (Altieri, 2002), surgen sistemas alternativos como la agricultura ecológica, que propone algunas soluciones a las problemáticas ambientales que se originan por los sistemas de manejo convencional (Gliessman, 1998, citado por Altieri, 2002).

Los sistemas ecológicos buscan optimizar la calidad de la agricultura y el ambiente en todos sus aspectos por medio de procesos que consisten básicamente en: conservar o aumentar la fertilidad del suelo e impedir la degradación de su estructura; evitar cualquier tipo de contaminación; no utilizar productos químicos de síntesis; controlar biológicamente las plagas y enfermedades de las plantas y respetar los equilibrios ecológicos naturales, entre otros (Mendoza et al., 2011). Además, la agricultura ecológica está profundamente arraigada en la racionalidad ecológica de la agricultura tradicional (Altieri y Toledo 2011), de tal forma que se integran sus componentes, se aumenta la eficiencia biológica general, y se mantiene la capacidad productiva y autosuficiente del agroecosistema (Altieri, 2002).

En este marco, surge la agricultura ecológica como una opción ambientalmente sostenible fundamentada en la conservación y mejoramiento de las condiciones

ecológicas del agroecosistema, tal como la conservación de los recursos suelo, agua y biodiversidad, para lograr la sostenibilidad de la producción a largo plazo (Boyce et al., 1993; Sosa et al., 2004; Borin y Pimentel 2003 citado por Silveira 2005). Y en respuesta a los desafíos que enfrentan continuamente los agroecosistemas cafeteros en Colombia para prevenir y mitigar el impacto de plagas y enfermedades sobre la competitividad y productividad del cultivo, las cuales han incrementado el riesgo ante las alteraciones climáticas recientes (Zuluaga et al., 1993).

En este contexto resulta importante realizar evaluaciones que determinen si la calidad del suelo es o no afectada por las prácticas agrícolas, específicamente indicadores bioquímicos como las actividades enzimáticas que son útiles porque son relativamente resistentes a los procesos de desnaturalización (Albiach et al., 2006), además están directamente implicadas en la transformación de las formas complejas de carbono de la materia orgánica a nutrientes fácilmente disponibles para las plantas (Ochoa et al., 2007), así mismo, están relacionadas con el reciclaje del N, P, C y S, ya que, por un lado, nos proporcionan información sobre el estado microbiológico del suelo, y por el otro, sobre sus propiedades fisicoquímicas (Ferrerías et al., 2009). Las actividades enzimáticas se sugieren como indicadores tempranos de cambios en la calidad del suelo, debido a que responden rápidamente a perturbaciones gracias a su sensibilidad al estrés ambiental.

Por lo tanto, el problema que la presente investigación planteó resolver, es la falta de conocimiento acerca de los impactos que generan las prácticas agrícolas (ecológicas vs convencionales) sobre indicadores bioquímicos de calidad del suelo como son las actividades enzimáticas sobre suelos asociados al cultivo del café. De la misma manera se buscó relacionar los parámetros anteriormente mencionados y las puntuaciones de resiliencia ante la variabilidad climática que ya se han reportado para estos agroecosistemas cafeteros. Lo anterior en el municipio de Anolaima, Cundinamarca en donde la caficultura representa una de las principales actividades económicas para el municipio.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación es relevante dado que la intensificación agrícola y el empleo de prácticas de manejo inadecuadas, han provocado el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y como consecuencia, la disminución de la calidad edáfica (Lal *et al.*, 1998), así mismo han alterado los balances de agua y energía, los ciclos del carbono, nitrógeno, azufre y otros elementos, siendo el equilibrio entre estos necesario para el desarrollo vegetal.

En el caso de la zona cafetera cada día aumenta el número de hectáreas de terreno erosionadas debido al mal manejo de algunos agricultores al momento de sembrar y realizar las labores de mantenimiento (FNC, 2012). Lo cual es notable ya que en Colombia, el café ha sido un producto de gran importancia en la economía nacional, por ejemplo, para el 2005 constituyó el 22% del producto interno bruto agrícola y su participación en las exportaciones a nivel nacional fue del 7% (FNC, 2005). Específicamente en el departamento de Cundinamarca, cerca de las tres quintas partes (59,5%), es decir, 163.348,04 hectáreas, corresponden a cultivos permanentes y semipermanentes, entre los cuales se destaca el café con 75.400 hectáreas, en el municipio de Anolaima merece destacar que el 27% de las tierras dedicadas a cultivos permanentes, se dedican a la siembra del café (MADR 2006).

Así mismo, el suelo es un sistema vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es clave para la producción de alimentos y para el mantenimiento de la calidad ambiental, además es indispensable para la vida ya que cumple un papel fundamental en el equilibrio global de la tierra (Ochoa *et al.*, 2007). También puede ser considerado como una entidad biológica, en donde las enzimas juegan un papel importante desde el punto de vista ecológico, al catalizar innumerables reacciones (Dick, 1997). El estudio de las actividades enzimáticas, permite conocer los procesos bioquímicos en el suelo y son consideradas como biosensores de los cambios que puedan producirse en la calidad del mismo, a consecuencia de las prácticas de manejo agrícola, o la contaminación (Martens *et al.*, 1992).

En este sentido, la enzima ureasa es importante dado que cataliza la hidrólisis de urea a dióxido de carbono y amonio, fuente de N disponible para las plantas (Garbisu et al., 2007). Igualmente la fosfatasa activa la transformación de fósforo orgánico a inorgánico, haciéndolo asimilable para las plantas (Avellaneda, 2008). Por su parte la fosfatasa ácida a partir de fósforo orgánico, libera fosfato, fuente de fósforo disponible para las plantas (Garbisu et al., 2007). Así mismo la β -glucosidasa participa en la hidrólisis de polímeros de residuos de plantas, como la celobiosa, liberando glucosa, fuente de energía para los organismos heterótrofos del suelo (Garbisu et al., 2007). Otras enzimas como las proteasas extracelulares producen oligopéptidos a partir de las proteínas, con la subsecuente liberación de compuestos de bajo peso molecular y aminoácidos, los cuales son asimilados por los microorganismos (Kandeler et al., 1996 citado por Avellaneda, 2008 p. 24).

Debido a esto, se consideró conveniente el estudio de la actividad enzimática en agroecosistemas cafeteros con diferentes sistemas de manejo, a fin de evaluar su efecto sobre las enzimas β -glucosidasa, proteasa, ureasa, fosfatasa alcalina y ácida, de igual manera se buscó determinar el potencial de estos parámetros biológicos como indicadores de la calidad del suelo. Además se considera relevante investigar las dinámicas acerca de las prácticas agrícolas y sus tendencias, ya que puede contribuir a establecer la sustentabilidad de los diferentes sistemas de manejo, su mejora puede generar beneficios económicos en forma de aumento de productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mejor calidad del aire, del agua, y la reducción de los gases de efecto invernadero (Brejda y Moorman, 2001). El presente proyecto se desarrolló en el marco del proyecto titulado “Calidad del suelo en agroecosistemas cafeteros (ecológicos y convencionales) en Anolaima, Cundinamarca” el cual fue aprobado en la convocatoria 2013-II del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las actividades enzimáticas de diferentes ciclos biogeoquímicos en suelos de agroecosistemas cafeteros (ecológicos y convencionales) del municipio de Anolaima, Cundinamarca-Colombia.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar actividades enzimáticas asociadas a el ciclo biogeoquímico del nitrógeno en los suelos seleccionados.
2. Evaluar actividades enzimáticas relacionadas con el ciclo biogeoquímico del fósforo en los suelos seleccionados.
3. Analizar la actividad enzimática de al menos una enzima indicadora del ciclo biogeoquímico del carbono en los suelos seleccionados.
4. Analizar las relaciones que existen entre las actividades enzimáticas, los parámetros físicos- químicos y las características biofísicas y culturales que determinan la resiliencia de los agroecosistemas de estudio.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEÓRICO

4.1.1. AGRICULTURA CONVENCIONAL, AGRICULTURA ORGÁNICA Y AGRICULTURA ECOLÓGICA

El uso del suelo para obtener bienes y servicios representa una de las alteraciones más sustanciales del ser humano sobre los ecosistemas del planeta (Tilman et al., 2002). Entre un tercio y la mitad de la superficie de la tierra ha sido transformada alterando la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Cassman et al., 2003) destacándose la modificación drástica del ciclo del agua (Cassman et al., 2003) y del nitrógeno (Vitousek et al., 1997).

En este sentido, los principales impactos ambientales provienen de la conversión de ecosistemas naturales a la agricultura (Tilman et al., 2002) asociada a las prácticas de manejo convencional, ya que se desvincula del medio natural, consume energía no renovable (combustibles fósiles), tiende al monocultivo, simplifica la diversidad biológica, utiliza tecnología dura basada en los insumos químicos, lo que la convierte en una actividad desequilibrada, dependiente y muy contaminante (Segrelles, 2001).

El modelo convencional surge durante las décadas de los años cincuenta y sesenta con la revolución verde, la cual generó profundos cambios en los sectores agropecuarios de Latinoamérica, constituyendo un foco fundamental de degradación ambiental, con un modelo agrario impuesto, basado en la intensificación productiva mediante la utilización masiva de tecnologías modernas, el riego, la mecanización, el uso de enmiendas y abonos químicos, la bioingeniería genética y el empleo de productos fitosanitarios (Segrelles, 2001).

Sin embargo, la agricultura convencional ha demostrado su capacidad de producción y rentabilidad a corto plazo, aunque los recursos suelo, agua y diversidad genética han sido sobre utilizados y los resultados no se han hecho esperar: suelos salinizados por el exceso de riego, compactación por exceso de labranza, pérdida de la capacidad de permeabilidad de los suelos e incremento de

escorrentía, contaminación de los suelos y aguas por plaguicidas, reducción de la calidad estructural del suelo por pérdida de materia orgánica y pérdida de la fertilidad e incremento de la erosión (Gliessman, 2002), así mismo, la liberación de gases de efecto invernadero, la eutrofización de los ríos, arroyos, lagos y ecosistemas costeros y marinos. La búsqueda se centra en las prácticas que pueden proporcionar los rendimientos sostenibles, preferiblemente comparables a los de alta intensidad de la agricultura, pero con menos ambiente de gestión (Tilman, 1998).

Según Altieri (1999) la agricultura orgánica es un sistema productivo que excluye el uso de fertilizantes, pesticidas sintéticos, hormonas y reguladores de crecimiento para la producción agrícola.

La diferencia más importante entre la agricultura orgánica y la convencional radica en que los agricultores orgánicos evitan o restringen el uso de fertilizantes y pesticidas químicos en sus prácticas agrícolas, mientras que los agricultores convencionales pueden usarlos extensivamente (Lampkin, 1990 citado por Nicholls, 2011). De hecho, los agricultores orgánicos utilizan maquinaria moderna, las variedades de cultivo recomendadas, semilla certificada, manejo perfecto del ganado, las prácticas recomendadas para la conservación del suelo y del agua e innovadores métodos de reciclaje de desechos orgánicos y manejo de residuos (Altieri, 1990).

Varios estudios se han llevado a cabo comparando los efectos de la agricultura orgánica versus la agricultura convencional revelando que los agricultores que utilizan un modelo orgánico ocasionan un menor impacto ambiental y tienen una mayor eficiencia energética (Nicholls y Altieri, 2011) demostrando mejor desempeño en términos de calidad de suelo y agua, de acuerdo con Kamiyama (2011).

Se deduce que la agricultura ecológica pertenece a las llamadas agriculturas alternativas que en su conjunto rechazan el uso de sustancias tóxicas para el manejo de insectos y enfermedades, privilegian los policultivos sobre el monocultivo

(no utilizan plantas transgénicas) y propenden por el manejo integrado del agroecosistema (Mendoza, 2011).

Según Altieri y Nicholls (2000) la estrategia agroecológica busca la revitalización y la diversificación de las pequeñas y medianas propiedades y el rediseño de las políticas agrarias del sistema alimentario, de manera que éste sea económicamente viable para los agricultores y los consumidores.

4.1.2. AGROECOLOGÍA

La agroecología es una disciplina científica que se enfoca en el estudio de una agricultura desde una perspectiva ecológica (Altieri y Nicholls, 2000). Es una ciencia que estudia la estructura y función de los agroecosistemas tanto desde el punto de vista de sus relaciones ecológicas como culturales (León, 2009).

El enfoque agroecológico considera a los ecosistemas agrícolas como las unidades fundamentales de estudio; y en estos sistemas, los ciclos minerales, las transformaciones de la energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas son investigadas y analizadas como un todo. De este modo, a la investigación agroecológica le interesa no sólo la maximización de la producción de un componente particular, sino la optimización del agroecosistema total (Altieri y Nicholls, 2000).

Diversos investigadores de la agroecología coinciden en afirmar que la crisis socioeconómica y ambiental de la agricultura industrializada a escala global ha originado de manera progresiva el surgimiento de la agroecología como un enfoque teórico y metodológico que, se nutre de varias disciplinas científicas, pretendiendo estudiar la actividad agraria desde perspectivas ecológicas y culturales (Mendoza, 2011).

Según Rosset (1997) la agroecología va más allá del panorama unidimensional de la genética, la agronomía y la edafología de los agroecosistemas, para comprender los niveles ecológicos y sociales de la coevolución, la estructura y la función. En

lugar de enfocarse en un componente particular del agroecosistema, la agroecología enfatiza la interrelación de todos los componentes del mismo, así como las complejas dinámicas de los procesos ecológicos

En síntesis la idea de la agroecología es ir más allá del uso de prácticas alternativas y desarrollar agroecosistemas con una dependencia mínima de agroquímicos y subsidios de energía, enfatizando sistemas agrícolas biodiversos y complejos, en los cuales las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes biológicos provean los mecanismos para que los sistemas subsidien la fertilidad de su propio suelo, la productividad y la protección de los cultivos (Altieri, 2009).

4.1.3. SISTEMAS CAFETEROS

Los sistemas de café se caracterizan por presentar diversas formas de manejo. Con base en la tipología de Moguel y Toledo (1999), creada para los cafeteros en México, se pueden identificar cinco tipos de sistema de producción, basados en el sombrío y el dosel, tres de caficultura tradicional (rústico, policultivo tradicional, policultivo comercial) y dos de sistemas intensivos (sombrio de una sola especie y monocultivo sin sombra) (Guhl, 2009).

A continuación se presenta una caracterización de los sistemas productivos:

- Rústico: el café es sembrado bajo la sombra de los árboles originales de la selva tropical. Este tipo de sistema está asociado a un bajo consumo de insumos.
- Policultivo tradicional: el café es sembrado bajo el bosque original, con otro tipo de cultivos de frutas y maderas. Se caracteriza por ser un sistema más complejo.
- Policultivo comercial: los árboles originales del bosque son reemplazados por otras especies útiles como sombrío.
- Sombrío de una sola especie: se usan los árboles de especies leguminosas como sombrío solamente.
- Monocultivo sin sombra: sistema de intensificación, sin sombra, el cual requiere de más insumos y fertilizantes (Guhl, 2009).

A partir de la segunda guerra mundial, el cultivo del café cambio su forma de producción de un sistema agroforestal con bajo impacto en el ambiente, a una caficultura con alto impacto ambiental, donde se usaron variedades mejoradas, con mayores demandas de agroquímicos, sembradas a mayor densidad y con menos uso o eliminación total de árboles de sombra (Vanegas, 2006). El fenómeno ha sido más profundo en Costa Rica y Colombia, donde más del 40% de las fincas de café han experimentado un alto grado de reducción de la sombra (Perfecto et al., 1996)

La eliminación de la sombra repercute sobre los beneficios de la asociación entre cafetos y árboles, ya que cultivar café “bajo sombra” reduce el estrés ambiental para el cafeto, lo que significa que los árboles modifican el ambiente para el café mediante sus raíces, ramas y hojas (Muschler, 1999). Además, los efectos ambientales del cultivo de café bajo sombra, incluyen efectos directos en el crecimiento y la producción de cafetos asociados. Este grupo abarca, principalmente, el nivel de sombra y cambios microclimáticos debidos a ella, las consecuencias indirectas y los cambios a largo plazo, se ven reflejadas en la fertilidad del suelo y efectos sobre plagas, enfermedades y malezas (Guharay et al., 1999; Staver, 1995)

Muchos de los efectos a largo plazo se expresan a través de las propiedades del suelo (Nair et al., 1999). El mantenimiento de niveles altos de materia orgánica es uno de los factores principales (Bornemisza et al., 1999; Fernández y Muschler, 1999; Vaast y Snoeck, 1999), tanto por su rol de mantener la estructura del suelo, como por su importancia como fuente y sustrato de nutrientes. El nivel de la materia orgánica en el suelo depende de la productividad del ecosistema como de su manejo (Muschler, 1999).

En Costa Rica se han realizado experimentos para comparar el rendimiento de café en sistema de producción convencional y orgánico (Alpizar 1997, Arias 1997, Campos 1997, Fonseca *et al.* 1997, Ramírez, 1997). En esas investigaciones, el café con manejo convencional mostró mayor rendimiento que el orgánico. Sin embargo, los datos corresponden a cafetales recién transformados a orgánicos, donde la producción normalmente es baja. A pesar de esto, se ha encontrado que

en sistemas de producción orgánicos pueden llegar a producir hasta 75% de la producción obtenida en cafetales convencionales, y en ciertos casos, algunas fincas con manejo orgánico producen más que aquellas con manejo convencional (Lyngbaek *et al.*, 1999).

La incidencia de enfermedades del fruto fue mayor en el sistema de producción convencional. En ambos sistemas, la enfermedad más importante fue *C. coffeicola*. La pérdida de frutos antes de la cosecha fue mayor en el cafetal con manejo convencional y mostró correlación con la incidencia de *C. coffeicola*, la incidencia en el fruto cosechado por planta también fue mayor en el cafetal con manejo convencional, lo cual incidió en una mayor pérdida de frutos (frutos vanos) en este sistema (Samayoa y Sánchez, 2001).

Según el estudio realizado por Escamilla *et al.* (2005), el éxito del café orgánico hasta el momento, la superficie cultivada y el volumen de producción es aún pequeño con respecto al café convencional (alrededor del 10%). Además, el café orgánico tuvo un mayor potencial de calidad, ya que la mayor parte del grano es cultivado en zonas de óptima altitud (< 900 msnm), bajo sombra diversificada, con predominio de variedades arábicas tradicionales (Typica y Borbón) y con prácticas importantes de conservación de suelos. En otras palabras, un agroecosistema de café, rico en biodiversidad la cual a partir de una serie de sinergismos subsidia la fertilidad edáfica, la fitoprotección y la productividad del sistema, se dice ser *sustentable o saludable* (Fernández y Muschler, 1999)

4.1.4. CALIDAD DEL SUELO

El suelo es un cuerpo natural compuesto por capas (horizontes del suelo) de constituyentes minerales de espesores variables, los cuales difieren de los materiales parentales en sus caracteres morfológicos, físicos, químicos y mineralógicos (Shukla y Varma, 2011). El término suelo, puede definirse como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen, además son considerados formaciones geológicas naturales desarrolladas

bajo condiciones muy diversas de clima, materiales de origen, organismos y topografía todos actuando en un período de tiempo, lo cual justifica su continua evolución y, en consecuencia, su gran variedad. Además, el suelo como parte de la Biosfera, respira, nitrifica, origina humus, siendo estos criterios biológicos, de gran importancia para los organismos que en él habitan y las transformaciones que realizan (Blaya y García, 2003).

El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo:

- a) Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).
- b) Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental).
- c) Favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997).

En este contexto, la Sociedad de la Ciencia del Suelo Americana define la calidad del suelo (CS) como “la capacidad funcional de un tipo de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humanos, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo” (Karlen *et al.*, 1997).

Para Doran y Parkin (1994) la calidad de suelo es " la capacidad de un suelo para funcionar dentro de límites de los ecosistemas para mantener la productividad biológica, la calidad del medio ambiente, y promover la salud animal y vegetal."

De acuerdo con Parr *et al.* (1992), un suelo de calidad es aquél que tiene la capacidad de producir cultivos sanos y nutritivos en forma sostenida a largo plazo, y de promover, al mismo tiempo, la salud humana y animal sin detrimento de los recursos naturales base o del medio ambiente circundante. En cambio, Gregorich *et al.* (1994), lo describen simplemente como la condición de un suelo para un uso determinado. Otros autores (Doran y Jones, 1996) prefieren considerar al término calidad de suelo y a sus descriptores como características físicas, químicas y biológicas inherentes a éste. Acton y Gregorich (1995) definen calidad de suelo

como la condición de éste para mantener el crecimiento de las plantas sin que ocurra degradación ni daños en el medio ambiente.

INDICADORES DE SUELO

Los indicadores de salud y calidad del suelo son un conjunto de parámetros (propiedades físicas, químicas y biológicas) que buscan establecer estándares de calidad para el recurso suelo (Avellaneda, 2008). En la actualidad, se ha intensificado el estudio de los indicadores bioquímicos y biológicos puesto que describen los principales procesos metabólicos que ocurren en el suelo, por lo tanto son de gran utilidad para evaluar la calidad edáfica. Por esta razón, estas variables del suelo pueden tener un rol fundamental como indicadores tempranos y sensibles de degradación o restauración de suelo como consecuencia de diferentes prácticas de manejo (Roldán, 2003).

Algunas de las condiciones que deben cumplir los indicadores según Masera *et al.* (1999) son:

- Ser integradores
- Ser fáciles de medir, basados en información objetiva y fácil de reconocer
- Ser adecuados al nivel de análisis y del sistema estudiado
- Ser preferentemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones
- Reflejar el atributo de sostenibilidad que se quiere evaluar
- Ser sencillos de entender
- Permitir cambios y diferencias entre sistemas indicadores
- Centrarse en aspectos prácticos y claros.

Los indicadores biológicos integran gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo tales como: abundancia y subproductos de micro y macro organismos (incluidos bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos). Incluyen funciones como tasa de respiración, tasa de descomposición de los residuos vegetales, N y C de la biomasa microbiana y actividad enzimática del suelo (SQI, 1996 citado por Avellaneda 2008).

Dentro de los indicadores de calidad se encuentran las actividades enzimáticas del suelo, las cuales se han sugerido como potenciales dentro del conjunto de indicadores, debido a su relación con la biología del suelo, ya que su presencia depende directamente de la continua liberación llevada a cabo por los organismos que habitan en el ecosistema (Burns, 1982 citado por Albiach, Bonmatí et al. 2006).

La actividad enzimática del suelo es importante porque refleja el estado en el que se encuentran sus poblaciones microbianas y su relación con la biología del suelo, la producción de biomasa, la degradación de contaminantes y la conservación de ecosistemas (Albiach et al., 2006).

En la agricultura, la actividad enzimática y otros indicadores biológicos, como la biomasa microbiana, se emplean como una medida de la fertilidad y del impacto de esta actividad en los suelos (García *et al.*, 2008).

4.1.5. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS

Las enzimas son proteínas cuyo papel fundamental es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos; actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos (Ochoa et al., 2007). Así mismo, la actividad enzimática en suelos cultivados también está relacionada con las prácticas de cultivo y puede asociarse de una manera directa con la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, debido a que estas juegan un papel importante en cada uno de los ciclos biogeoquímicos de elementos requeridos para el crecimiento de las plantas (Torres y Lizarazo, 2006).

Los microorganismos son una de las principales fuentes de enzimas del suelo, en el cual las actividades enzimáticas desempeñan un papel importante por su relación con la evolución y procesos degradativos de la materia orgánica, con los ciclos de elementos como nitrógeno, fósforo, carbono, azufre; así como, con el metabolismo intracelular, pudiendo ser considerados como catalizadores que generan información importante para el entendimiento del suelo como ecosistema. Particularmente, entre los factores que pueden afectar las actividades enzimáticas del suelo tienen notable importancia la especie vegetal cultivada, el manejo agrícola

y el uso de enmiendas (Burns, 1982; Acosta y Tabatabai, 2000; Ahmad et al., 2001). En ese sentido investigaciones sobre la actividad de las enzimas extracelulares en diversos ecosistemas han mostrado que los productos químicos utilizados en agricultura (fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, entre otros) influyen sobre las enzimas del suelo (Tabatabai, 1994; Alvear et al., 2006)

4.1.5.1. **UREASA.**

La ureasa es la enzima responsable de la hidrólisis de la urea fertilizante aplicada al suelo en NH_3 y CO_2 con el aumento concomitante en el pH del suelo (Andrews et al., 1989; Byrnes y Amberger 1989 citado por Shukla, G., Varma, 2011). La enzima ureasa se encuentra ampliamente distribuida en la naturaleza, estando presente en células de microorganismos, plantas y animales. Esta enzima también cataliza la hidrólisis de la hidroxíurea, dihidroxíurea y semicarbazida; contiene níquel y su peso molecular se encuentra en el rango de 151 a 480 KDa (Alef y Nannipieri., 1995 citado por Avellaneda 2008).

La actividad enzimática de la ureasa, consiste en catalizar la hidrólisis de la urea a amonio, fuente de N disponible para las plantas (Garbisu et al., 2007). La actividad de esta enzima en el suelo es influenciada por muchos factores, estos incluyen la historia de cultivo, contenido de materia orgánica del suelo, la profundidad del suelo, enmiendas del suelo, los metales pesados y los factores ambientales tales como temperaturas (Tabatabai 1977; Bremner y Mulvaney, 1978).

4.1.5.2. **PROTEASA**

Las proteasas en el suelo juegan un papel importante en la mineralización de N (Ladd y Jackson, 1982 citado por Shukla, 2011).

La actividad proteasa del suelo es la responsable de la descomposición progresiva del N contenido en las proteínas; procede de diferentes tipos de microorganismos, de residuos de las plantas y de la mesofauna del suelo. Las proteasas se clasifican, de acuerdo con el sustrato sobre el que actúan, sean éstos simples como caseína o más complejos como la N-benzoil-L-arginina amida (BAA), que parece estar

relacionada con la actividad proteolítica ligada a los coloides húmicos (Alvear et al, 2006).

La cantidad de esta actividad de la enzima extracelular puede ser indicativo no sólo de la capacidad biológica del suelo para la conversión enzimática del sustrato, que es independiente de la medida de la actividad microbiana, pero también podría tener un papel importante en la ecología de los microorganismos en el ecosistema (Burns, 1982 citado por Shukla, 2011).

4.1.5.3. FOSFATASA ÁCIDA Y ALCALINA

El ciclo biogeoquímico del fósforo (P) en el suelo es un sistema dinámico y complejo que involucra la acumulación del elemento en la biomasa microbiana, materia orgánica y formas inorgánicas. No obstante, el componente orgánico central del ciclo del P es la biomasa microbiana (Stewart y Tiessen, 1987), la cual es una fracción lábil controlada por factores ambientales y por aquellos relacionados con el manejo de los suelos (Picone y Zamuner, 2002). El fósforo constituye uno de los macroelementos esenciales en la nutrición de las plantas (Selvacumar, 1994) este elemento en la naturaleza no se encuentra en estado puro, sino en forma de fosfatos, los cuales son esenciales para los procesos biológicos y por lo tanto para la vida (Barrios et al., 2010).

Particularmente, las fosfatasas detectadas en el suelo constituyen un grupo de enzimas de gran importancia en la dinámica de uno de los nutrientes más importantes para las plantas, como lo es el fósforo (P), pues participan en la mineralización del P orgánico, constatando su importancia si se tiene en cuenta que cerca del 90% del suelo está presente en forma orgánica (Portilla et al., 1998).

La actividad fosfatasa cataliza la hidrólisis de ésteres de fosfato, liberando los grupos fosfato que estén en enlazados a sustratos más complejos como la materia orgánica del suelo, siendo así las responsables de la mineralización del fósforo orgánico en forma de fósforo inorgánico el cual queda disponible para los requerimientos de microorganismos y plantas. Esta actividad se clasifica en ácida

(pH 6.5) o alcalina (pH 11) según su pH óptimo, las fosfatasas ácidas se derivan tanto de plantas como de microorganismos, mientras que las alcalinas se derivan principalmente de microorganismos (Cerón et al., 2011).

En los agroecosistemas convencionales, son varios los factores que influyen en la respuesta de la aplicación de fertilizantes fosfatados, entre ellos: el contenido de P en el suelo, contacto de las raíces con el suelo y la concentración de P en la solución del suelo fertilizado (Fixen, 1997). En el caso del cafeto, ha sido poco frecuente la respuesta a este elemento; Carvajal (1984) plantea que este cultivo es poco exigente al fósforo, por poseer un mecanismo de absorción eficiente.

La cantidad de la fosfatasa ácida de las raíces de las plantas se ha demostrado que difieren entre las especies de cultivos y variedades (Ndakidemi, 2006; Izaguirre-Mayoral y Carballo, 2002), así como prácticas de cultivo (Ndakidemi, 2006; Patra et al., 1990; Staddon et al., 1998; Wright y Reddy, 2001). Por consiguiente, se prevé que las prácticas de gestión que inducen estrés P en la rizósfera también puede afectar la secreción de estas enzimas en el ecosistema (Ndakidemi, 2006).

En Colombia, Gonzáles et al., (2002) estudiaron la actividad de esterases y fosfatasas ácidas y alcalinas en rizósfera de maracuyá bajo manejo agroecológico y convencional, encontrando mayor actividad en los primeros 15 cm de profundidad, en los primeros meses de desarrollo del cultivo, con manejo convencional y altos contenidos de materia orgánica y fósforo disponible en manejo agroecológico.

Un estudio de la actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo, arrojó que la mayor actividad de fosfatasa ácida se presentó en el manejo tradicional y difirió significativamente del químico y orgánico. El menor valor se encontró bajo el manejo orgánico y difirió significativamente de los otros manejos, la mayor actividad en el manejo tradicional puede relacionarse con el origen de la materia orgánica constituida por residuos frescos provenientes del plátano y de otros cultivos de la zona de estudio (Yoshioka et al., 2006). En contraste en el manejo químico no se aplicó materia orgánica, se hizo uso de herbicidas, urea y agroquímicos en general. Mientras que la mayor actividad de fosfatasa alcalina, correspondió al manejo químico, y menor para los

manejos tradicional y orgánico sin diferencia significativa entre estos dos últimos. El resultado se asocia con la mayor actividad de los microorganismos como gasto energético, pues el comportamiento de esta enzima está relacionado con la actividad de bacterias y hongos del suelo (Criquet et al., 2004; Dick, 1997), que conlleva un metabolismo acelerado y se refleja en la actividad enzimática (Sánchez, 2003).

4.1.5.4. **β -GLUCOSIDASA**

La β -glucosidasa cataliza la hidrólisis de β -D-glucósidos, dando como producto glucosa, que es una fuente importante de energía para los microorganismos del suelo (Tabatabai, 1982 citado por Alvear, 2006).

La β -glucosidasa es una enzima común y predominante en los suelos (Eivazi y Tabatabai 1988; Tabatabai 1994). Esta enzima juega un papel importante en los suelos, ya que está implicada en la catálisis de la hidrólisis y biodegradación de diversos glucósidos presentes en la descomposición de los restos vegetales en el ecosistema (Ajwa, Tabatabai, 1994; Martínez, Tabatabai, 1997). Su producto final es la glucosa, una fuente importante de energía para la vida de los microbios en el suelo (Esen, 1993; Shukla y Varma, 2011).

En el estudio de Bonanomi et al. (2011), se compararon 20 granjas agrícolas seleccionadas en el sur de Italia seleccionando las fincas donde se aplicaban altos y bajos insumos, analizando muestras de 31 parámetros incluyendo actividades enzimáticas como β -glucosidasa, mostrando como resultado que las actividades enzimáticas por la administración del suelo.

4.6. **CAMBIO CLIMÁTICO**

El cambio climático se refiere a modificaciones en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persisten durante un periodo extendido (décadas o más). Puede deberse a cambios naturales o a persistentes cambios antropogénicos en la composición de la atmósfera o en los usos del suelo (Anderson et al., 2007). En este

contexto, la deforestación y el cultivo del suelo han aportado el 40% de las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera causadas por las actividades humanas desde 1850 (Houghton, 2003)

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2007), las actividades humanas están exacerbando los cambios naturales en el clima, y los cambios observados y proyectados tendrán importantes impactos en los ecosistemas, en los sistemas físicos y en las actividades humanas que se relacionan con los dos anteriores. De acuerdo con algunos científicos (*i.e.* Tompkins, Adger, 2004), los cambios en el clima tienden a manifestarse mediante cambios lentos en las condiciones medias del clima, aumento en la variabilidad interanual y de temporada, incremento en la frecuencia de eventos extremos y cambios rápidos en el clima que ocasionan alteraciones catastróficas en los ecosistemas. De acuerdo con la Resilience Alliance (2013), en los ecosistemas la resiliencia es la capacidad de los mismos para tolerar perturbaciones sin colapsar en un estado cualitativamente distinto, controlado por un conjunto diferente de procesos; de resistir alteraciones y reconstruirse a sí mismo cuando es necesario.

Según Nicholls y Altieri (2011) el cambio climático podría tener impactos y consecuencias negativas sobre la producción agrícola, lo que ha generado interés para buscar maneras de incrementar la resiliencia de agroecosistemas, siendo el método más racional y efectivo la diversificación de estos. Estudios realizados en laderas después del huracán Mitch en América Central demostraron que los agricultores que usaban prácticas de diversificación tales como cultivos de cobertura, cultivos intercalados y agroforestería sufrieron menos daño que sus vecinos convencionales que usaban monocultivos. El análisis, encabezado por el Movimiento Campesino a Campesino movilizó 100 equipos de agricultores-técnicos y 1.743 agricultores para realizar observaciones pareadas de indicadores agroecológicos específicos en 1.804 fincas diversificadas y convencionales. El estudio involucró 360 comunidades y 24 departamentos en Nicaragua, Honduras y Guatemala. Después del huracán las parcelas diversificadas tenían entre 20% a 40% más capa superior de suelo, mayor humedad en el suelo, menos erosión y

sufrieron menores pérdidas económicas que las experimentadas por sus vecinos convencionales (Holt, 2001).

En este sentido, experimentos de simulación de cambios en la temperatura y precipitación, indican cambios en la actividad enzimática del suelo (Sardans et al., 2008), lo que probablemente tenga consecuencias en forma de cambios en la disponibilidad de carbono y nutrientes en el suelo junto con cambios en la composición microbiana de la flora edáfica.

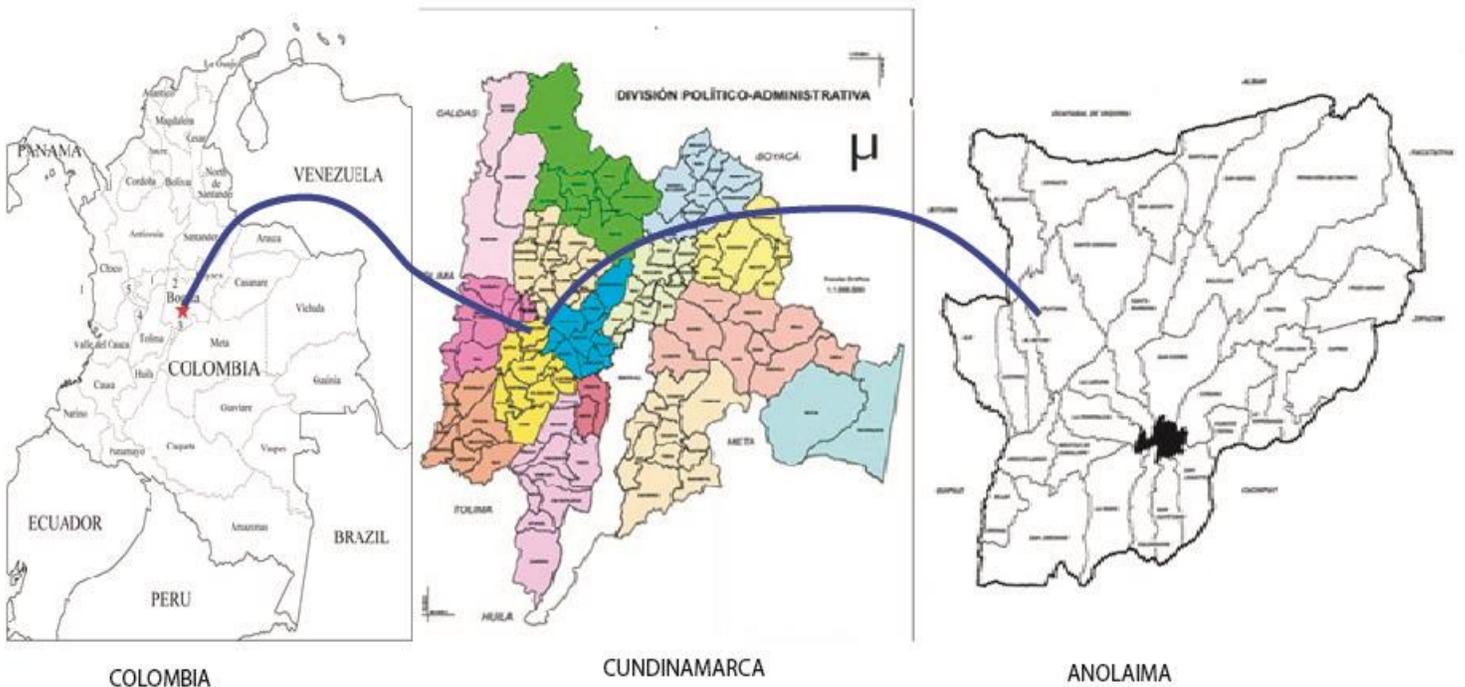
4.2. MARCO GEOGRÁFICO

El Municipio de Anolaima está ubicado en el Departamento de Cundinamarca, provincia del Tequendama, ubicado en el pie de monte de uno de los brazos de la Cordillera Oriental, denominada Cruz Verde. Limita al Norte con los municipios de Guayabal de Síquima y Albán, por el oriente se encuentran los municipios de Facatativá y Zipacón, al sur se encuentra el municipio de Cachipay y por el costado occidental colinda con los municipios de Quipile y Bituima.

El municipio ocupa un área aproximada de 118.8 km², que representan el 0,3545% del total del área del Departamento del cual hacen parte 116 municipios; Anolaima abarca 11.883,39 has. Distribuidas de la siguiente forma: 11.742,9 hectáreas en sector rural y 87,41 has en el casco urbano de Anolaima; 45,32 has en la zona urbana de La Florida; 3,65 has en la zona urbana de Reventones; 3,11 has en la zona urbana de corralejas y aproximadamente una hectárea en la zona urbana de Boquerón.

Geográficamente su cabecera municipal está localizada a 1'018.300 metros al norte de la línea del ecuador y 957.000 metros al este del meridiano de Greenwich 74° 27'54" de longitud oeste de meridiano de Greenwich, con una altura de 1.650 m.s.n.m y una temperatura media de 20°C.

FIGURA NO 1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: secretaria de planeación (2006). Banco Medios. Escala Grafica 1:1.000.000. <http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co>

4.3. MARCO LEGAL

El presente proyecto debe estar acorde con los requisitos legales y normativos de la actualidad, para garantizar una viabilidad en la normativa colombiana.

Constitución política de Colombia: Art. 79 y 80: Corresponde al Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de esos fines, Igualmente, tiene a su cargo planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental.

Decreto 1843 de 1991 del Ministerio de Salud: Por la cual se reglamenta el uso y el manejo de plaguicidas.

Decreto 1443 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: Reglamenta la prevención y control de la contaminación ambiental por el manejo de plaguicidas y desechos o residuos peligrosos provenientes de los mismos.

Resolución 0170 de 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: por la cual se declara en Colombia el año 2009 como año de los suelos y el 17 de Junio como Día Nacional de los Suelos y se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio nacional.

Decreto Ley 2811 de 1974 Código de los Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: Art. 180: “Es deber de todos los habitantes de la República colaborar con las autoridades en la conservación y en el manejo adecuado de los suelos. Las personas que realicen actividades agrícolas, pecuarias, forestales o de infraestructura, que afecten o puedan afectar los suelos, están obligadas a llevar a cabo las prácticas de conservación y recuperación que se determinen de acuerdo con las características regionales”.

Resolución 0148 de 2004 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR): por la cual se establecen los requerimientos para obtener el Sello Único Nacional de Alimento Ecológico, otorgado por el MADR a aquellos productores que se encuentren certificados con entidades debidamente acreditadas ante la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) y autorizadas por el MADR.

Resolución 187 de 2006 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: Por la cual se adopta el reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación, comercialización, y se establece el Sistema de Control de productos Agropecuarios Ecológicos.

Resolución 036 de 2007 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: mediante la cual se modifica la administración y uso de la resolución 0148 de 2004 creada para otorgar el Sello Único Nacional de Alimento Orgánico.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. HIPÓTESIS CENTRAL

Las actividades enzimáticas del suelo son modificadas por el manejo agrícola (ecológico y convencional) en los agroecosistemas cafeteros seleccionados en Anolaima, Cundinamarca.

5.2. MATERIAL BIOLÓGICO DE TRABAJO

Se realizó muestreo en los agroecosistemas ecológicos: Don José, El laurel y Los pantanos, y en los agroecosistemas convencionales: El turista, La cajita y Don Arturo, ubicados en Anolaima (Cundinamarca, Colombia).

Los agroecosistemas ecológicos se caracterizan por ser autosuficientes, realizan prácticas de conservación de suelos, no emplean herbicidas, insecticidas, fungicidas o fertilizantes químicos y por el contrario emplean la biodiversidad como estrategia de manejo de insectos y agentes de enfermedades, utilizan abonos orgánicos, zanjas de drenaje y coberturas permanentes, estas fincas poseen cuerpos de agua, y los agricultores pertenecen a alguna organización (Córdoba y León, 2013).

Por otra parte, los agroecosistemas convencionales se caracterizan por un manejo con uso de fertilización química, herbicidas, plaguicidas; emplean formulaciones a base de hongos (*Beauveria bassiana* y *Metarhiziumanisopliae*) o insecticidas, además de fungicidas y herbicidas de síntesis química (aldrines, calbaryl (sevin), manzate, glifosato). Las prácticas campesinas relacionadas con el manejo ecosistémico muestra que las fincas convencionales poseen prácticas de almacenamiento y cosecha de agua (Córdoba y León, 2013).

Se desarrollaron dos momentos de muestreo teniendo en cuenta los meses de mayor y menor precipitación reportados por el IDEAM para dicho lugar en los últimos años. El primer muestreo se realizó en el mes de abril siendo esta la época de mayor precipitación, la cual fue denominada invierno, el segundo muestreo se realizó en el mes de junio, siendo ésta la época de menor precipitación, por tanto fue catalogada como sequía. La toma de muestras se realizó en suelos rizosféricos de los seis agroecosistemas, para lo cual se establecieron cuadrantes de 10 por 10 metros, tomando en zig-zag 5 puntos y 5 submuestras por cada punto, posteriormente se retiraron los primeros 2 cm del suelo y se extrajo la muestra. Después se mezclaron las submuestras hasta obtener una muestra compuesta homogénea por finca, posteriormente se empacaron y se rotularon para su identificación. Para efectos de este proyecto se empleó la siguiente nominación para cada finca:

TABLA No 1: NOMINACIÓN DE LOS AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).

MANEJO	NOMBRE AGROECOSISTEMA	NOMINACIÓN
Ecológico	Los Pantanos	E1
Ecológico	El Laurel (Los Ocobos)	E2
Ecológico	Don José	E3
Convencional	Don Arturo (El Mirador)	C1
Convencional	La Cajita	C2
Convencional	El Turista	C3

5.3. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS ASOCIADAS A EL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL NITRÓGENO.

Objetivo específico 1: Evaluar y comparar actividades enzimáticas asociadas a el ciclo biogeoquímico del nitrógeno en los suelos seleccionados

Determinación de la enzima ureasa

Para el análisis de la actividad de la enzima ureasa ($\mu\text{g N} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot 2\text{h}^{-1}$) en cada una de las muestras, se empleó el método reportado por Alef y Nannipieri (1995), que se fundamenta en la determinación colorimétrica del amoníaco liberado, luego de la incubación de las muestras de suelo con solución de urea por 2 horas a 37°C. (Alef y Nannipieri, 1995 modificado por Avellaneda 2008). Para lo cual se tomaron 0.1g de suelo, se adicionaron 0.4mL de Buffer Borato pH 10, y 0.05mL de sustrato Urea (720mM) a excepción de los controles, se incubaron las muestras durante 2 horas a 37°C y 120 rpm, posteriormente se adicionaron 0.05mL de sustrato de urea a los controles, seguidamente tanto a las muestras como a los controles se les agregaron 0.6mL de KCl 1M, se colocaron en el agitador rotatorio durante 30 minutos, se centrifugó a 8000rpm por 5 minutos, se pipeteó 0.1mL del sobrenadante y se le agregaron 0.9mL de agua destilada, se le adicionó 0.5mL de solución de Salicilato de sodio/ NaOH y 0.2mL de dicloroisocianuro de sodio, por último se

dejaron en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente y se midió absorbancia a 690 nm (Avellaneda, 2008).

Este procedimiento se realizó con tres réplicas y dos controles para cada muestra; en donde se tuvieron en cuenta los valores de absorbancia y la ecuación de la recta determinada en la curva de calibración, con el objetivo de calcular la actividad enzimática expresada como $\mu\text{g N} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot 2\text{h}^{-1}$ (Kandeler *et al.*, 1996 modificado por Avellaneda, 2008).

Determinación de la enzima proteasa

Para el cálculo de la actividad de la enzima proteasa ($\mu\text{g tyr} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot 2\text{h}^{-1}$), se empleó caseína como sustrato, luego de la incubación de las muestras de suelo por 2 horas a 50°C y pH de 8.1. Los aminoácidos liberados durante el período de incubación son extraídos y el sustrato remanente es precipitado después de la adición del ácido tricloroacético. Los aminoácidos reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu en solución alcalina para formar un complejo azul el cual es determinado colorimétricamente (700nm). (Ladd y Butler, 1972).

El procedimiento experimental consistió en la toma de 0.1g de suelo, se le adicionaron 0.5mL de Buffer Tris 50mM, 0.5mL de caseína al 2% a las muestras, se incubó durante 2 horas a 50 °C, se adicionó 0.5mL de caseína al 2% a los controles, seguidamente tanto a las muestras como a los controles se les agregó 0.5 mL de ácido tricloroacético al 15%, se centrifugó a 10000 rpm durante 10 minutos, posteriormente se tomaron 0.5mL de sobrenadante, se mezclaron con 0.75 mL de reactivo alcalino y se incubaron durante 15 minutos a temperatura ambiente, luego se le adicionar 0.5mL de reactivo Folin-Ciocalteu, se incubaron durante 1,5 horas a temperatura ambiente, se centrifugó a 10000rpm durante 10 minutos y finalmente se midió absorbancia a 700nm (Avellaneda, 2008).

Este procedimiento se empleó con tres réplicas y dos controles para cada muestra; en donde se tuvieron en cuenta los valores de absorbancia y la ecuación de la recta determinada en la curva de calibración, con el objetivo de calcular la actividad

enzimática expresada como $\mu\text{g tyr} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dm} \cdot 2 \text{ h}^{-1}$ (Ladd y Butler, 1972 modificado por Avellaneda, 2008).

5.4. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS RELACIONADAS CON EL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL FÓSFORO.

Objetivo específico 2: Evaluar y comparar actividades enzimáticas relacionadas con el ciclo biogeoquímico del fósforo en los suelos seleccionados.

Determinación de la enzima fosfatasa alcalina y ácida

El análisis de la enzima fosfatasa alcalina y ácida ($\mu\text{g PNP} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dm} \cdot \text{h}^{-1}$), se realizó por un método que se basa en la determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación de las muestras de suelo con solución de p-nitrofenilfosfato por 1 hora a 37°C (Alef y Nannipieri, 1995). El p-nitrofenol liberado por la actividad de la fosfomonoesterasa es extraído y coloreado con solución de hidróxido de sodio, finalmente éste es determinado fotométricamente a 400nm (Tabatabai y Bremmer, 1969; Eivazi y Tabatabai, 1977; modificado por Avellaneda 2008).

Para la determinación de las fosfatasas, se tomaron 0.2g de suelo, se adicionaron 0.8 mL de Buffer MUB pH 6.5 o pH 11, para fosfatasa ácida y alcalina respectivamente, se adicionaron 0.2 mL de p-nitrofenilfosfato a las muestras, se incubaron las muestras durante 1 hora a 37°C a 120 rpm, se le adicionaron 0.2 mL de sustrato a los controles, posteriormente tanto a las muestras como a los controles se les adicionó 0.2mL de CaCl_2 0.05M y 0.8mL de NaOH 0.5M, seguidamente se centrifugaron a 8000rpm durante 5 minutos, se pipetearon 0.4mL de sobrenadante y se llevaron a 2mL de agua destilada, finalmente se midió absorbancia a 400nm (Avellaneda, 2008).

Este método se empleó con tres réplicas y dos controles para cada muestra; en donde se tuvieron en cuenta los valores de absorbancia y la ecuación de la recta determinada en la curva de calibración, con el objetivo de calcular la actividad

enzimática expresada como como $\mu\text{g PNP} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Tabatabai, 1982; Eivazi y Tabatabai, 1988)

5.5. ANÁLISIS DE ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE AL MENOS UNA ENZIMA INDICADORA DEL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CARBONO.

Objetivo específico 3: Analizar la actividad enzimática de al menos una enzima indicadora del ciclo biogeoquímico del carbono en los suelos seleccionados.

Determinación de la enzima β - glucosidasa

Para el cálculo de la enzima β - glucosidasa ($\mu\text{g PNP} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot \text{h}^{-1}$), se usó el método que consiste en la determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación del suelo con solución de p-nitrofenilglucósido por 1 hora a 37 ° C. El p-nitrofenol liberado por la actividad de la β -Glucosidasa es extraído y coloreado con solución de hidróxido de sodio; finalmente éste es determinado fotométricamente a 400nm (Alef y Nannipieri, 1995 modificado por Avellaneda, 2008).

El procedimiento experimental para la determinación de la actividad de la β -glucosidasa, consistió en la toma de 0.2g de suelo, se adicionaron 0.8 mL de Buffer MUB pH 6.0, se adicionaron 0.2 mL de sustrato p-nitrofenil- β -D-glucósido (25mM) a las muestras. Se incubaron las muestras durante 1 hora a 37°C a 120 rpm, se le adicionaron 0.2 mL de sustrato a los controles, seguidamente tanto a las muestras como a los controles se les adicionó 0.2mL de CaCl_2 0.05M y 0.8mL de Buffer Tris NaOH 0.1M pH 12, posteriormente se centrifugaron a 8000rpm durante 5 minutos, se pipetearon 0.4mL de sobrenadante y se llevaron a 2mL con Buffer Tris 0.1M pH 10, finalmente se midió absorbancia a 400nm (Avellaneda, 2008).

Este procedimiento se realizó con tres réplicas y dos controles para cada muestra; en donde se tuvieron en cuenta los valores de absorbancia y la ecuación de la recta determinada en la curva de calibración, con el objetivo de calcular la actividad

enzimática expresada como como $\mu\text{g PNP} \cdot \text{g}^{-1} \text{dm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Tabatabai, 1982; Eivazi y Tabatabai, 1988).

5.6. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS, LOS PARÁMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS Y LAS CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS Y CULTURALES QUE DETERMINAN LA RESILIENCIA DE LOS AGROECOSISTEMAS.

Objetivo específico 4: Analizar las relaciones que existen entre las actividades enzimáticas, los parámetros físicos- químicos y las características biofísicas y culturales que determinan la resiliencia de los agroecosistemas de estudio.

Para la determinación de parámetros fisicoquímicos se utilizaron los siguientes métodos:

TABLA No 2: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO- QUÍMICOS.

PARÁMETRO	MÉTODO DE ANÁLISIS	VALORACIÓN
Humedad	Relación masa de agua-suelo	Gravimétrica
Consistencia	Límites de Atterberg	Gravimétrica
Densidad aparente	Terrón parafinado	Gravimétrica
pH	Suspensión en H ₂ O	Potenciométrico
Conductividad eléctrica	Extracto de la pasta de saturación	Conductimétrica
Carbono orgánico oxidable	Walkley – Black	Colorimétrica
Nitrógeno total	Estimado a partir de CO	
Bases intercambiables (Ca, K, Mg, Na)	Extracción con NH ₄	Absorción atómica
CIC efectiva	Desplazamiento del NH ₄	Volumétrica
Acidez intercambiable	Extracción con KCl	Colorimétrica
Fósforo disponible	Bray II	Turbidimétrica
Microelementos (Cu, Fe, Mn, Zn)	Extracción con DTPA	Absorción atómica
Azufre (S)	Extracción con fosfato monocálcico	
Boro (B)	Extracción con fosfato monocálcico	Colorimétrica

Se realizó análisis univariado, para evaluar el comportamiento de los datos, y establecer si existían diferencias significativas entre los parámetros determinados para los agroecosistemas ecológicos y convencionales. Con los parámetros físicos químicos y las actividades enzimáticas, se realizaron pruebas de normalidad y homoscedasticidad por medio de Shapiro Wilk y Bartlett. Adicionalmente se efectuaron comparación de medias, para lo cual se usó Wilcoxon y t- student.

Posteriormente se emplearon herramientas de análisis multivariado de datos para establecer las relaciones entre los parámetros fisicoquímicos, las actividades enzimáticas (asociadas a los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, carbono y fósforo), y las características biofísicas y culturales que determinan la resiliencia ante la variabilidad climática de los agroecosistemas.

Para evaluar las relaciones existentes entre las actividades enzimáticas, los parámetros fisicoquímicos y las características biofísicas y culturales que determinan la resiliencia ante la variabilidad climática de los agroecosistemas de estudio, se retomaron las puntuaciones de resiliencia reportadas para los

agroecosistemas ecológicos y convencionales frente a la variabilidad climática en Anolaima (Cundinamarca- Colombia), desarrolladas por Cindy Alexandra Córdoba Vargas y Tomas Enrique León Sicard en el 2013, las cuales fueron evaluadas en escala de 1 a 5 a partir de 62 criterios: 4 de tipo físico, 5 de suelos, 4 de manejo de suelos, 8 de manejo de aguas, 9 de diversidad biológica, 13 de aspectos sociales, 7 de aspectos económicos, 6 de aspectos institucionales, 3 de aspectos políticos y 3 de nivel tecnológico, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla No. 3.

En el análisis multivariado de los datos se consideraron componentes principales para determinar si existen altas correlaciones entre las variables, así mismo, se empleó el escalamiento multidimensional (MDS), el cual es una técnica estadística multivariada que representa los datos en un espacio de baja dimensionalidad, es decir que ilustra proximidades en un espacio métrico (normalmente euclídeo) con todas sus propiedades.

TABLA No 3: RESUMEN EVALUACIÓN DE RESILIENCIA DE FINCAS ECOLÓGICAS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

CRITERIOS	FINCAS					
	ECOLÓGICAS			CONVENCIONALES		
	Los Pantanos	El laurel (Los Ocobos)	Don José	Don Arturo (El Mirador)	La Cajita	El turista
1. Físicos	1,00	1,50	1,75	1,50	1,50	1,75
2. Suelos	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
3. Manejo de suelos	5,00	5,00	5,00	1,75	1,75	2,00
4. Manejo de aguas	3,54	4,15	3,23	1,67	1,75	1,85
5. Diversidad biológica	4,50	4,89	4,56	1,67	2,11	1,78
6. Aspectos sociales	3,08	4,31	3,31	2,77	3,31	3,08
7. Aspectos económicos	2,29	3,86	2,29	2,86	3,14	2,57
8. Aspectos institucionales	2,50	4,00	3,00	1,66	3,50	2,00
9. Aspectos políticos	3,00	3,67	3,67	2,33	3,00	2,33
10. Aspectos tecnológicos	3,33	5,00	3,67	2,33	3,67	3,00
TOTAL	2,98	3,91	3,14	2,12	2,62	2,29

Fuente: Córdoba y Sicard (2013).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS AGROECOSISTEMAS EN ESTUDIO

Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos realizados a las 12 muestras tomadas, se describen en las Tablas No 4, 5, 6 y 7, presentadas a continuación, en las cuales se destacan los valores que presentan diferencias

estadísticamente significativas debido al manejo (ecológico y convencional) y a la época de muestreo (invierno y sequía).

Se puede apreciar que los resultados indican que tres parámetros químicos tienen diferencias estadísticamente significativas asociados con el manejo (ecológico y convencional) de los seis agroecosistemas en estudio: 1. El porcentaje de carbono orgánico (CO) 2. El contenido de nitrógeno del suelo (N) 3. El contenido de boro en el suelo (B). mostrando ser en promedio más alto en las fincas ecológicas que en las fincas convencionales. En los próximos párrafos se desarrollará la discusión acerca de cada uno de estos parámetros de forma más específica.

TABLA No 4: PROMEDIO DE PARÁMETROS FÍSICOS DE SUELOS EVALUADOS EN AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES DE ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

FACTORES EVALUADOS		HUMEDAD	DENSIDAD APARENTE TOTAL	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
		%		
MANEJO	ECO	37,25 a	1,031 a	11,23 a
	CON	45,11 a	1,037 a	13,10 a
ÉPOCA	INV	41,74 a	1,035 a	14,01 a
	SEQ	40,61 a	1,033 a	10,32 a

Letras iguales: No tiene diferencia estadística significativa
 Letras diferentes: Tiene diferencia estadística significativa.
 ECO: Ecológica, CON: Convencional, INV: Invierno, SEQ: Sequía.

TABLA No 5: PROMEDIO DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE SUELOS EVALUADOS EN AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES DE ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

FACTORES EVALUADOS		pH	CO	N	AI	CICE	P
			%		meq/100g	mg/Kg	
MANEJO	ECO	5,95 a	7,99 a	0,69 a	0,05 a	26,28 a	51,81 a
	CON	5,70 a	5,09 b	0,44 b	0,19 a	25,08 a	51,36 a
ÉPOCA	INV	5,80 a	6,37 a	0,55 a	0,05 a	24,67 a	52,46 a
	SEQ	5,85 a	6,72 a	0,58 a	0,19 a	26,70 a	51,77 a

Letras iguales: No tiene diferencia estadística significativa
 Letras diferentes: Tiene diferencia estadística significativa.
 ECO: Ecológica, CON: Convencional, INV: Invierno, SEQ: Sequía.

TABLA No 6: PROMEDIO DE PARÁMETROS QUÍMICOS BASES INTERCAMBIABLES DE SUELOS EVALUADOS EN AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES DE ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

ACTORES EVALUADOS		Ca	K	Mg	Na
		meq/100g			
MANEJO	ECO	19,357 a	0,927 a	5,875 a	0,070 a
	CON	18,233 a	1,027 a	5,537 a	0,093 a
ÉPOCA	INV	17,657 a	0,963 a	5,905 a	0,085 a
	SEQ	19,933 a	0,990 a	5,507 a	0,078 b

Letras iguales: No tiene diferencia estadística significativa
 Letras diferentes: Tiene diferencia estadística significativa.
 ECO: Ecológica, CON: Convencional, INV: Invierno, SEQ: Sequía.

TABLA No 7: PROMEDIO DE PARÁMETROS QUÍMICOS ELEMENTOS MENORES DE SUELOS EVALUADOS EN AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES DE ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

FACTORES EVALUADOS		Cu	Fe	Mn	Zn	B
		mg/ Kg				
MANEJO	ECO	2,38 a	106,17 a	11,71 a	16,52 a	0,80 a
	CON	2,10 a	129,05 a	12,70 a	9,60 a	0,55 b
ÉPOCA	INV	2,50 a	130,63 a	12,55 a	12,74 a	0,68 a
	SEQ	1,98 a	104,58 a	11,85 a	13,38 a	0,67 a

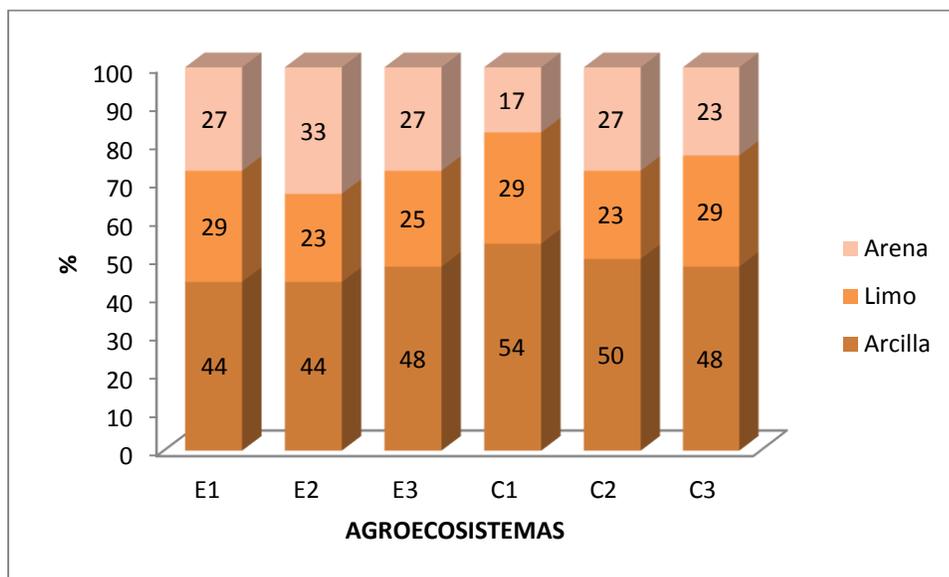
Letras iguales: No tiene diferencia estadística significativa
 Letras diferentes: Tiene diferencia estadística significativa.
 ECO: Ecológica, CON: Convencional, INV: Invierno, SEQ: Sequía.

6.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Como se observa en la Figura No 2 los suelos evaluados correspondieron a la clasificación textural arcillosos, con porcentajes de arcilla entre 44 y 54%,

situación que puede estar relacionada con la formación del suelo y la edad de los mismos.

FIGURA No 2: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

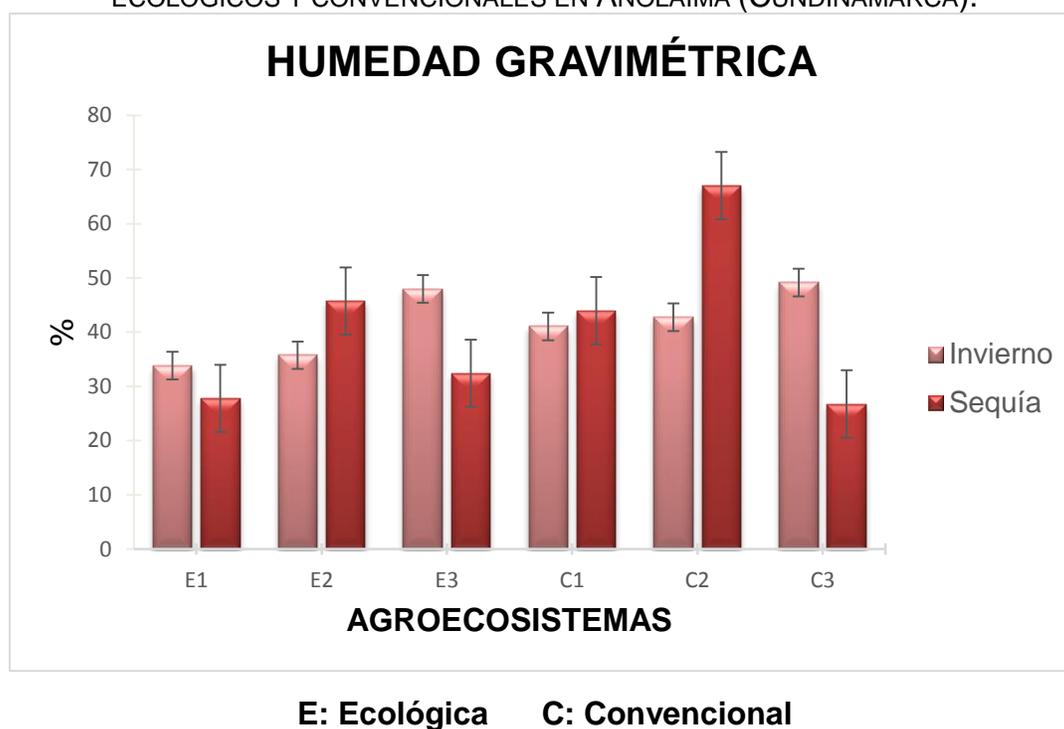
6.1.2. % HUMEDAD

De acuerdo con la Tabla No 4 y la Figura No 3 la humedad fue alta tanto en el sistema de manejo ecológico como en el convencional.

En cuanto a la época, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo en invierno todas las muestras presentaron porcentajes de humedad por encima del 35% lo que significa que tienen porcentajes muy altos de humedad, lo anterior está asociado con los altos contenidos de arcilla que poseen los suelos de estudio, por lo cual presentan una elevada capacidad de retención de agua, aunque en este tipo de suelos la aireación no suele ser suficiente, un alto contenido en materia orgánica ayuda a superar el exceso de agua, ya que mantiene las partículas de arcilla unidas entre sí, formando agregados entre los cuales queda

espacio para el aire (Thompson et al., 1988). Estudios similares realizados por Rao et al. (1997), revelaron que los agroecosistemas que poseen árboles de sombra generan una menor radiación solar y velocidad del viento, aumentan la temperatura en el ambiente, lo que hace que se disminuya la demanda de agua de los cultivos y la evaporación del suelo, lo cual explica el mayor contenido de humedad encontrado en los cafetales con guamo.

FIGURA No 3: HUMEDAD GRAVIMÉTRICA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



6.1.3. DENSIDAD APARENTE

Como se puede observar en la Figura No 4 y en la Tabla No 4 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al manejo. En general la densidad aparente de las todas las fincas mostró valores entre 1,03 y 1,004 g. cm⁻³, lo que las ubica en la especificación de buena densidad aparente (IGAG, 1990).

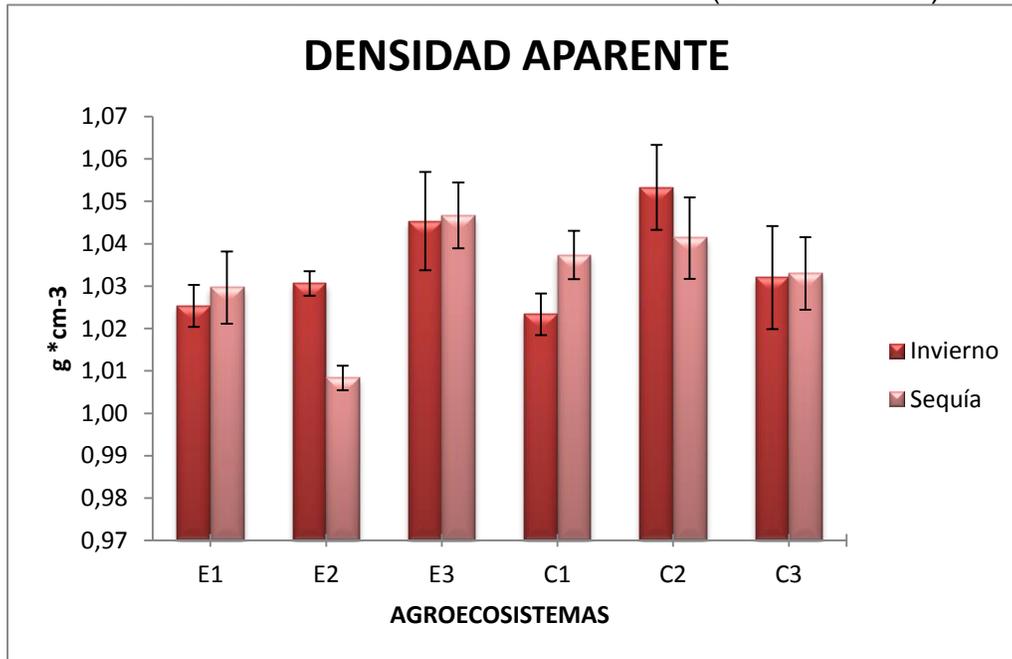
Esto posiblemente es porque la historia de manejo agrícola para estas fincas siempre se ha caracterizado por tener practicas campesinas dentro de las se maneja el policultivo, sombrío y en general propenden por la protección del suelo, lo que concuerda con Taboada y Álvarez (2008), quienes señalan que la buena calidad física del suelo determina un ambiente adecuado para el desarrollo de las raíces vegetales, y debido a que la densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g.cm^{-3} o t. m^{-3}), describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso y es una forma de evaluar la resistencia del suelo a la elongación de las raíces (Keller y Hakansson, 2010).

En este sentido Taboada y Álvarez (2008), afirman que la densidad aparente varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica puede variar estacionalmente por efecto de labranzas y con la humedad del suelo sobre todo en los suelos con arcillas expandentes. Lo cual puede estar relacionado con el menor valor de densidad aparente para los suelos de los agroecosistemas convencionales (ver Tabla No 4). Igualmente Silva et al., (2000), indican que la densidad aparente es afectada por la vegetación, el contenido de materia orgánica, uso y el manejo del suelo.

De igual modo como se observa en la Tabla No 4 no se encontraron diferencias significativas en cuanto a la época de muestreo (invierno y sequia), indicando que la variabilidad climática no estaría afectando los niveles de este elemento en los suelos de los agroecosistemas de estudio.

Según Salamanca y Sadeghian (2006) para lograr un buen crecimiento en las plantas de café en la etapa de establecimiento en los suelos de la zona cafetera colombiana deben manejarse con prácticas culturales que minimicen los riesgos de compactación orientados a reducir en algún grado su densidad aparente mediante la aplicación de compuestos orgánicos, entre otras prácticas.

FIGURA No 4: DENSIDAD APARENTE EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).

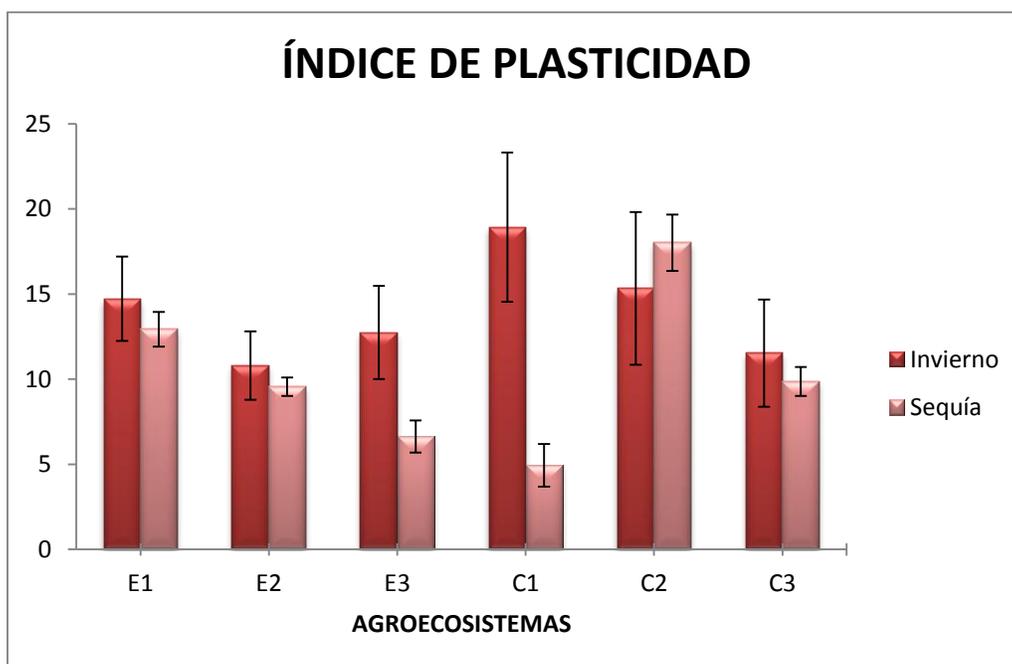


E: Ecológica C: Convencional

6.1.4. INDICE DE PLASTICIDAD

Como se aprecia en la Tabla No 4 y en la Figura No 5 no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en el índice de plasticidad por sistemas de manejo. Según la clasificación, los suelos en estudio presentaron índices de plasticidad entre 10-19 lo que los cataloga como suelos moderadamente plásticos. De acuerdo con Blanco (2009) existe una estrecha relación entre la plasticidad y la consistencia del suelo. Por tanto, esta cualidad suele ser usada para caracterizar el comportamiento mecánico del suelo. Así mismo Ball et al., (2000) señalan que la plasticidad es una variable importante para predecir la susceptibilidad a la compactación del suelo. En cuanto a la época, el índice de plasticidad no arrojó diferencias estadísticamente significativas, aunque este fue mayor en época de invierno con respecto a la época de sequía, lo que puede estar relacionado con el contenido de humedad y con las condiciones microclimáticas que generan los policultivos en los agroecosistemas de estudio.

FIGURA No 5: ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.1.5. CARBONO ORGÁNICO

El porcentaje de carbono orgánico arrojó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo (ver Tabla No 5), sin embargo como se puede observar en la Figura No 6, en general los seis agroecosistemas en estudio presentan valores por encima del 5% lo cual los ubica en la categoría de muy alto carbono orgánico. Esto quiere decir que se considera que el alto contenido de este elemento es un aspecto productivo debido a que estos agroecosistemas se caracterizan por tener prácticas campesinas que incluyen policultivo, no aplican maquinaria pesada y en general dan un buen manejo de los suelos propendiendo así porque las mayoría de sus propiedades químicas, físicas y biológicas se mantengan o se aumenten (Martínez et al., 2008).

En cuanto a las diferencias presentadas por manejo el contenido de carbono orgánico es mayor en las fincas ecológicas lo que puede estar relacionado con las

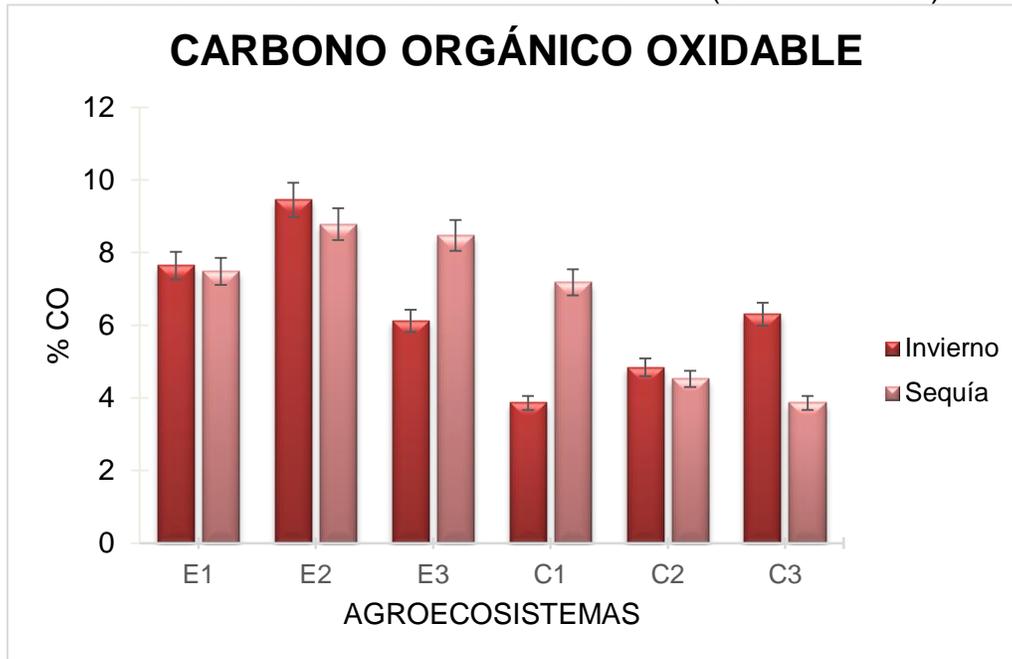
prácticas de conservación de suelos que emplean los campesinos como el manejo de arvenses, la utilización de purines, compostajes, cubiertas de suelo y la cero labranza; tal como lo afirma Sánchez de Prager *et al.*, (2012) quienes indican que estas prácticas traen beneficios como el menor gasto de carbono por respiración y mayor captura como biomasa y la acumulación superficial de la materia orgánica entre otras. Al respecto Roldán *et al.*, (2005) reportaron que la no-labranza del suelo aumenta los valores de carbono orgánico.

De acuerdo con lo anterior Ernani y Bayer (2001) afirman que los diferentes tipos de manejo como por ejemplo la fertilización y el uso de plaguicidas pueden afectar el almacenamiento de carbono. Esto puede estar relacionado con las diferencias estadísticas de este elemento siendo menor para las fincas convencionales en estudio. Sin embargo Calambas (2009) indica que en 42 sistemas de producción de café orgánico y tradicional en el departamento del Cauca donde se estudiaron las propiedades físicas y químicas de los suelos se encontró que no hubo diferencias significativas entre estas propiedades y se muestra que las fincas orgánicas presentan valores más bajos del CO frente a las fincas con manejo tradicional.

El porcentaje de carbono orgánico no presentó diferencias estadísticas debidas a la época de muestreo (ver Tabla No 5), como posible explicación se encuentra que la biodiversidad y el policultivo que se maneja en estos agroecosistemas cobra importancia ante efectos adversos como consecuencia del cambio climático porque son más resilientes ante eventos catastróficos (Valera, 2010) por tanto se podría explicar la no diferencia en época de muestreo para el contenido de este elemento.

Igualmente Porras (2006) señala que en sistemas de café ubicados dentro del corredor biológico Turrialba- Jiménez en Costa Rica donde se comparó el impacto de los sistemas de producción orgánico y convencional en época seca y lluviosa sobre las características del suelo se mostró que los indicadores que marcan diferencias entre tipos de manejo son la densidad, el contenido de Mg, K y CO. Este último correlacionándose con suelos bajo producciones boscosas y orgánicas.

FIGURA No 6: CARBONO ORGÁNICO SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.1.6. NITRÓGENO TOTAL

Como se muestra en la Figura No 7, y en la Tabla No 5 el porcentaje de nitrógeno tuvo diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo siendo mayor para las fincas ecológicas; sin embargo, en general el contenido de este elemento para los seis suelos en estudio son mayores al 0.3% de N lo que los ubica en una categoría de muy alto contenido de nitrógeno (IGAG, 2007). Esto posiblemente porque las prácticas campesinas de manejo como las enmiendas orgánicas y la heterogeneidad entre plantas favorecen el contenido de nutrientes del suelo lo que explicaría el por qué el contenido de este elemento para las seis fincas se encuentra en la misma categoría. Al respecto Castillo et al., (2000) indica que en el caso de los compost, estos ejercen una acción fertilizante en el suelo y además contribuyen al mejoramiento físico-químico de los suelos.

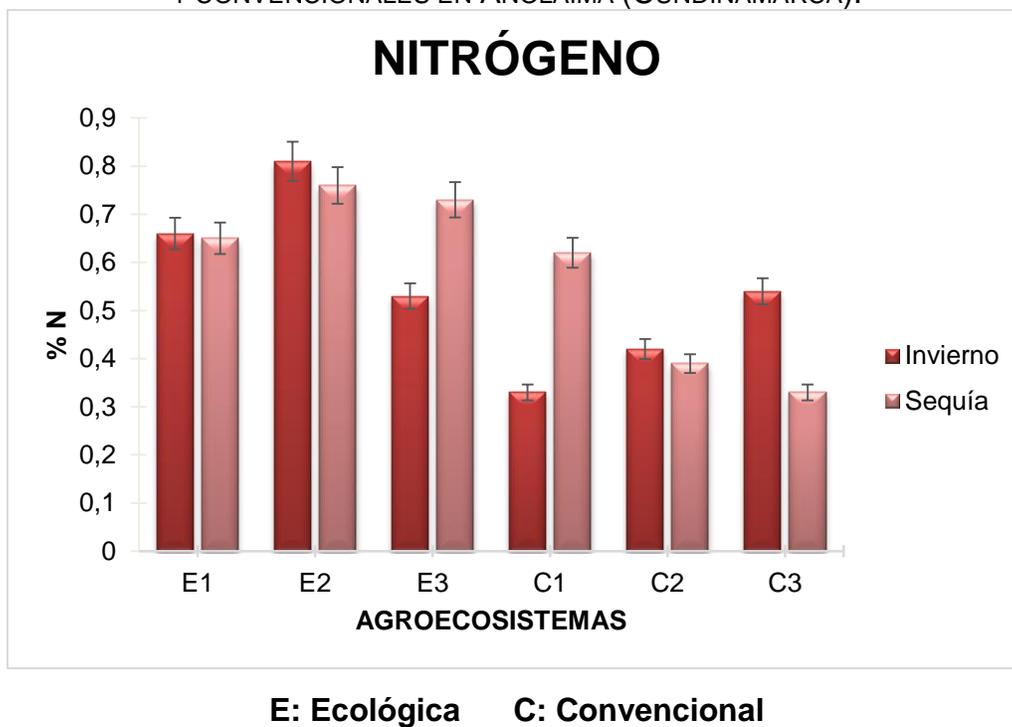
Sin embargo los resultados arrojan diferencias significativas siendo mayor el contenido de este elemento para los agroecosistemas ecológicos lo que puede estar relacionado con las prácticas como la aplicación de agroquímicos, que ejercen una presión selectiva sobre los microorganismos, lo que con el tiempo, puede modificar las características fisicoquímicas y biológicas del suelo (Manna y Singh, 2001). Según Nannipieri et al., (2003) citado por Zapata (2010) factores ambientales como el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de fuentes de energía y otros nutrientes así como la presencia de factores de crecimiento como el agua disponible, la temperatura, la presión, el pH, el potencial de óxido-reducción y la estructura de la superficie de las partículas del suelo pueden afectar la ecología, actividad y dinámica de las poblaciones en el suelo. Por tanto la sensibilidad de estas comunidades microbianas se pueden estar afectando negativamente en los agroecosistemas de manejo convencional y por tanto estar afectando comunidades microbianas que incidan positivamente en el ciclo del nitrógeno como son las bacterias fijadoras de nitrógeno.

En la literatura hay reportes contradictorios, para describir el efecto de las prácticas agrícolas en algunas variables físico – químicas del suelo. Mader *et al.*, (2002) citado por Zapata, (2010) señalan que en campos experimentales sometidos por más de 21 años a manejo tradicional y orgánico son pocas las diferencias encontradas en las propiedades físico-químicas de los suelos con los dos manejos. Sin embargo (Blaya *et al.*, 2003), afirman que en suelos con una textura, topográfica y de drenaje similares, el contenido de nitrógeno varía frecuentemente con las prácticas de cultivo.

En contraste otro estudio realizado por Abreu et al., (2007), indican que en los páramos venezolanos se analizó el destino de N agregado por fertilización mineral en una parcela cultivada con papa y se comparó con el balance de N de una parcela sin fertilizar encontrando que la producción de tubérculos fue mayor en la parcela fertilizada así como un porcentaje mayor del contenido de %N.

En cuanto a la influencia de las condiciones climáticas el porcentaje de nitrógeno no arrojó diferencias significativas, sin embargo como se puede observar en la Figura No 7 el contenido de este elemento fue mayor en época de sequía, como posible explicación se puede decir que uno de los procesos que genera la pérdida de este elemento es la lixiviación de nitrato a fuentes superficiales o subterráneas de agua, dado que este es un elemento altamente móvil (Smil, 1997; Vitousek *et al.*, 1997 citado por Zapata, 2010).

FIGURA No 7: NITRÓGENO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



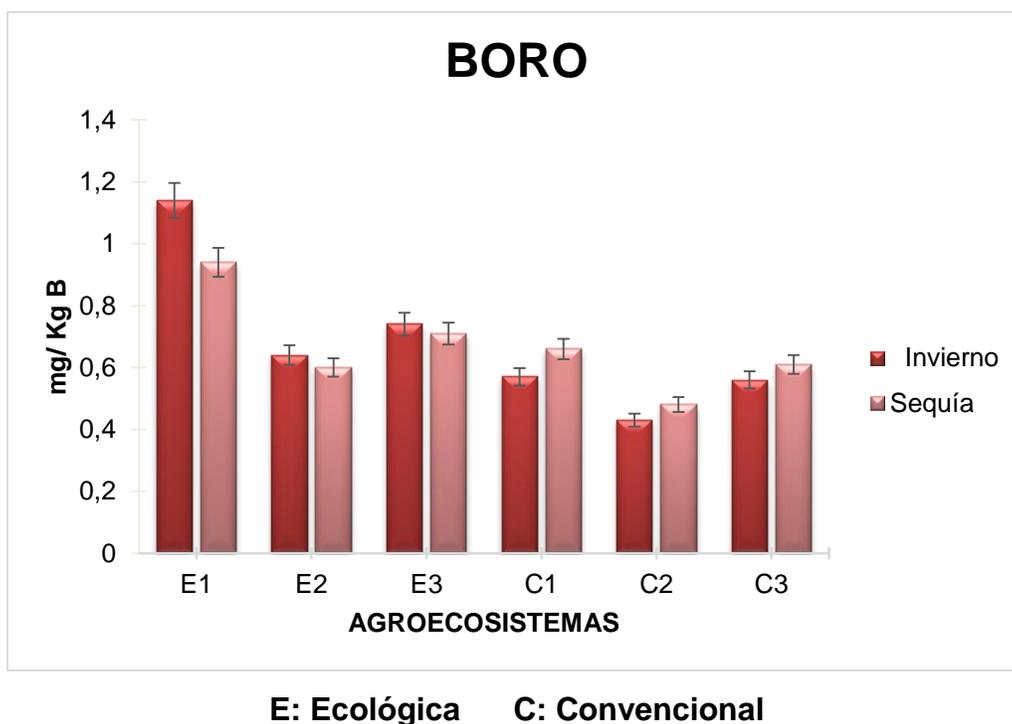
6.1.7. Boro

Se ha sugerido que para un buen nivel de fertilidad, los contenidos de B deben estar entre 0.6-1.0 ppm (IGAG, 2007), lo que indica que el contenido de este elemento en los agroecosistemas de estudio se encuentra dentro de los parámetros esperados para una óptima calidad del suelo, además este elemento generó diferencias

estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, presentando mayor disponibilidad en los suelos de los agroecosistemas ecológicos como se muestra en la Tabla No 7 lo que puede estar relacionado con la textura, el tipo de arcilla, la cantidad de materia orgánica y el pH. Además este último influye en la absorción de boratos por arcillas y así su influencia es especialmente importante en suelos arcillosos.

Por otro lado, aunque este elemento no presentó diferencias estadísticamente significativas por época, el contenido de B fue mayor en época de sequía con respecto a la época de invierno.

FIGURA No 8: N (%) EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



6.1.8. pH

Como se puede observar en la Tabla No 5 y en la Figura No 9 en general no se encontraron diferencias estadísticamente significativas por la época de muestreo (invierno y sequía), igualmente el pH tampoco presentó diferencias significativas

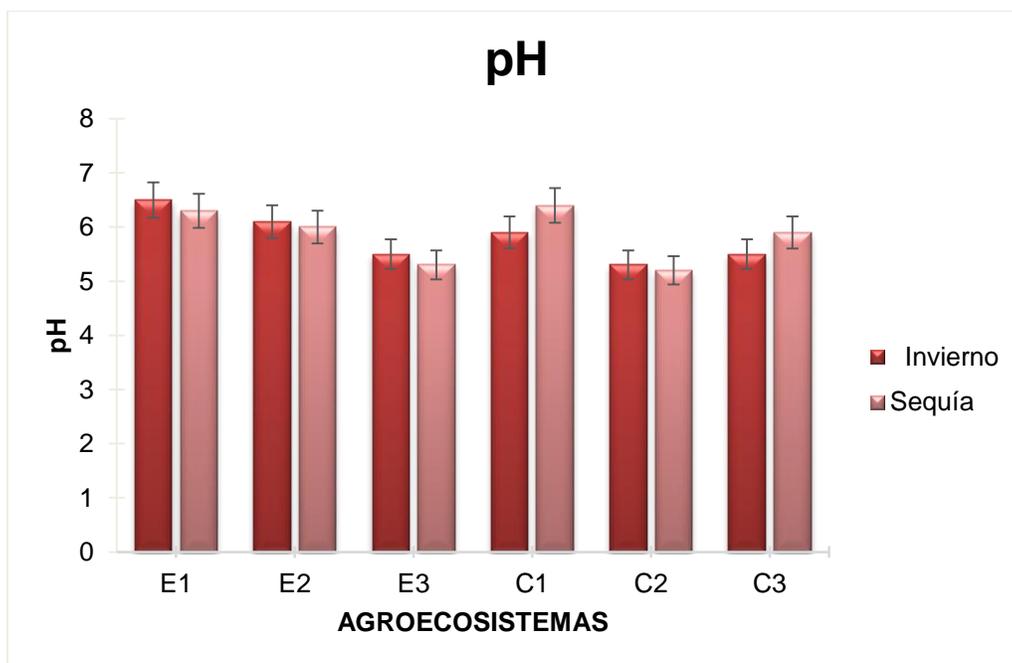
entre sistemas de manejo (ecológico y convencional) en los agroecosistemas de estudio, sin embargo, el valor de este elemento para las tres fincas ecológicas dió en promedio más alto que para las fincas de manejo convencional, el pH de los seis suelos es mayor a 5,5 siendo estos considerados como medianamente ácidos (IGAC, 2007). Posiblemente el régimen percolante de las precipitaciones pueda ser la causa de que se esté presentando acidez en los suelos de las seis fincas en estudio, al respecto (SCCS, 1990 citado por Avellaneda, 2008) afirman que el manejo del suelo puede inducir su acidificación, a través de tres mecanismos principales: a. Por irrigación, debido al lavado consecutivo de bases; b. Por fertilización, especialmente cuando los suelos han recibido dosis altas y/o frecuentes de fertilizantes nitrogenados, como formas amoniacales que liberan H^+ al suelo en su conversión a formas nítricas; c. Por extracción de nutrientes, pues corrientemente los cultivos extraen dosis significativas de bases (Ca, Mg y K especialmente) del suelo, para su normal desarrollo.

En este sentido Vitousek et al., (1997), indican que la acidificación del suelo puede ser porque el magnesio y el calcio son lixiviados y el aluminio movilizado. Por otro lado el incremento de la acidez del suelo trae aparejada la alteración de procesos químicos naturales, la disponibilidad de nutrientes, así como la actividad de los microorganismos se ven afectados. (Millán et al., 2010).

Si bien los resultados muestran que en general el pH de las seis fincas son consideradas como medianamente ácidas, se puede observar que el contenido de pH es más cercano a neutro para los agroecosistemas de manejo ecológico, debido a que en las fincas convencionales se hace aplicación de agroquímicos lo cual puede cambiar el contenido de pH, Haynes y Mokolobate 2001; Guo et al., (2011) afirman que los valores de pH del suelo disminuyen bajo la fertilización nitrogenada. Al respecto Sadeghian (2004), indica que los fertilizantes nitrogenados generan un excedente de H^+ que gradualmente reemplaza las bases, que son lavadas y transportadas a los horizontes subyacentes.

Igualmente en un estudio reportado por Ávila et al., (2010), señalan que en un cafetal ubicado en el municipio de El Socorro (Santander), se evaluó el efecto combinado de tres fuentes de abonos orgánicos (gallinaza, pollinaza y lombrinaza) y dos fuentes de fósforo (fosfato diamónico–DAP y superfosfato triple–SFT), sobre el crecimiento de las plantas de café, se muestra que el pH de los suelos es aumentado por la adición de abonos orgánicos.

FIGURA No 9: PH EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

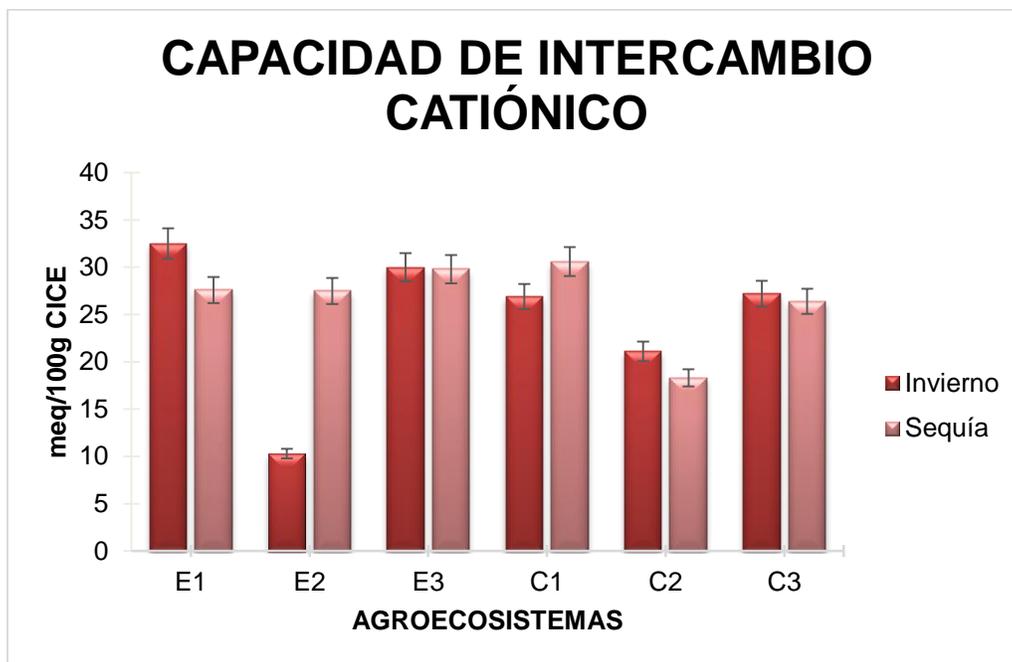
6.1.9. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC).

En general la capacidad de intercambio catiónico (CIC), para las seis muestras en estudio no tuvo diferencias significativas en cuanto al manejo (Tabla No 5 y la Figura No 10) el valor promedio de CIC para las fincas ecológicas fue de 26,28 meq/100g y en las fincas convencionales fue de 25,08 meq/100g; siendo mayor para la fincas ecológicas, lo que está relacionado con las prácticas de manejo y la mayor materia orgánica producto de los residuos de cosecha que mejora las propiedades físicas de la estructura del suelo, incrementando la retención del agua y la porosidad del suelo, el mejoramiento de propiedades químicas, que incrementan la capacidad de intercambio catiónico, la fertilidad del suelo por la liberación de nutrientes esenciales para las plantas y la capacidad buffer de éste (Rodríguez, 2009).

En contraste Quinchoa et al., (2010) señalan que en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en un suelo con propiedades andicas en Santa Rosa de Osos (Antioquia, Colombia), se encontraron respuestas positivas en rendimiento a las aplicaciones de NPK, Ca, Mg, B y S como fertilizantes químicos.

La CIC no presentó diferencias estadísticamente significativas por efecto de la condición climática, una posible explicación es que en la mayoría de los agroecosistemas en estudio además de haber plantaciones de café hay plantaciones de plátano y otras variedades de vegetación que sirven como sistema de sombrero para el café contribuyendo a que los nutrientes del suelo no se pierdan por escorrentía o exposición directa a los rayos del sol. En este sentido Ramírez et al., (2014) afirman que el movimiento de nutrientes por percolación afecta la fertilidad natural del suelo y la disponibilidad de los nutrientes de la solución del suelo que ingresan al sistema por la mineralización de la materia orgánica o la meteorización de los materiales que la originan, afectando de manera negativa la productividad del sistema.

FIGURA No 10: CIC EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.1.10. BASES INTERCAMBIABLES

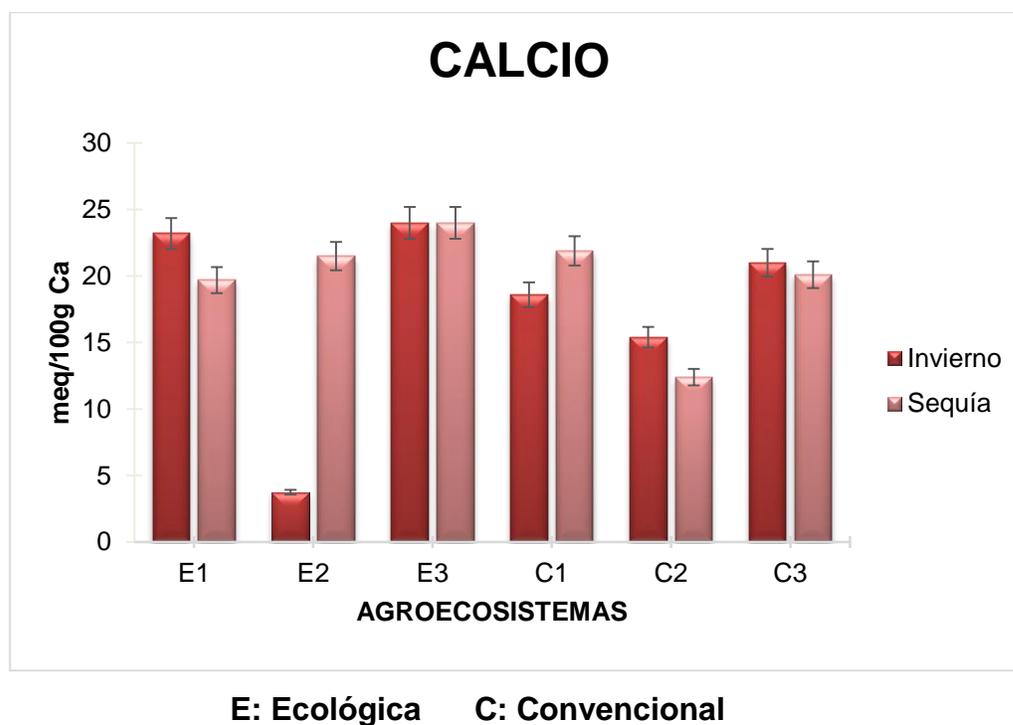
6.1.10.1. CALCIO (Ca).

El contenido de calcio no mostró diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, como se puede apreciar en la Tabla No 6 y en la Figura No 11. En promedio las muestras de Ca de las seis fincas en estudio son superiores a 17,55 (meq/100g), por lo cual se considera que tienen altos niveles de calcio. (IGAG 2007). En general esto quiere decir que en ambos agroecosistemas se está permitiendo que haya un buen contenido de este elemento, lo que puede estar relacionado con las diferentes prácticas campesinas que tienen en común estos agroecosistemas como el policultivo. Según Sánchez de Prager *et al.*, (2012) la biodiversidad que se expresa arriba de un agroecosistema complejo, tiene su expresión abajo, en el suelo, en diversidad de rizósferas, lo que influye en la disponibilidad permanente de nutrientes, gracias a la variedad de moléculas de diferente origen, con tasas de mineralización diferentes que aseguran un suministro

pausado y continuo de los nutrientes. Así mismo Sadeghian et al., (2013) afirman que en Colombia, raras veces se observan síntomas de deficiencia de Ca y S en cultivos de café.

De acuerdo con la Tabla No 6 el contenido de calcio no tuvo diferencias significativas por época de muestreo, sin embargo, se puede observar que el contenido de este elemento es mayor para las fincas ecológicas en época de sequía lo que puede estar relacionado con las prácticas de conservación de los suelos, el abono verde y la cobertura vegetal, ya que estas prácticas regulan la temperatura del suelo evitando cambios bruscos y lo protegen del sol para evitar su calentamiento exagerado (Primavesi, 1980 citado por Sánchez et al., 2012).

FIGURA No 11: CA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



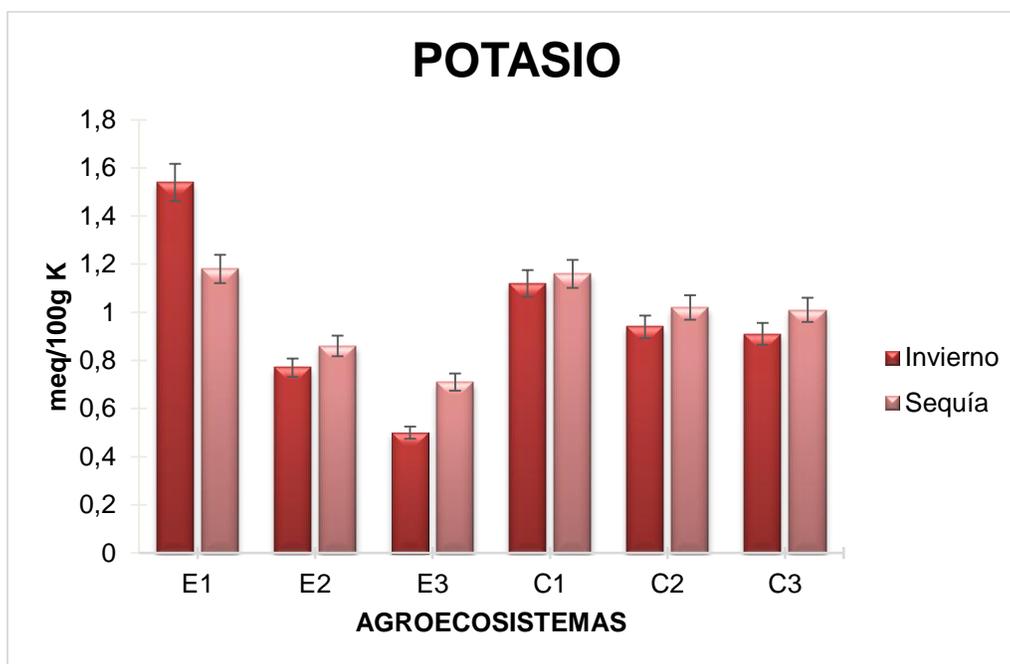
6.1.10.2. POTASIO (K)

El potasio (K) no presentó diferencias estadísticamente significativas en cuanto al manejo (ecológico y convencional) como se puede observar en la Tabla No 6 y en la Figura No 12 sin embargo el nivel de K para el presente estudio fue mayor en los agroecosistemas convencionales frente a los ecológicos. Una posible explicación es que la adición de fertilizantes pudiera estar aumentando el contenido de este elemento. Lo cual concuerda con el estudio de Sadeghian et al., (2005), en cafetales tecnificados a plena exposición solar y alta densidad en suelos del departamento del Quindío, se evaluó la respuesta de los cultivos a cinco combinaciones de N, P, K y Mg; se encontró que el efecto de la fertilización con K se manifiesta en una de las fincas que tenía deficiencia de ese nutriente, sin embargo los efectos de la aplicación del potasio solo se manifestó después de 4 años.

Igualmente en un estudio reportado por Kamiyama, et al., (2011) señalan que en Sao Paulo (Brasil) se seleccionaron dos regiones para evaluar las prácticas de conservación de los productores y evaluar la calidad del suelo en la agricultura ecológica y convencional, los resultados de las características químicas muestran que fue mayor el K para la agricultura convencional.

El contenido de K no tuvo diferencias estadísticamente significativas por época de muestreo (invierno y sequía) como se muestra en la Tabla No 6, sin embargo, las fincas de manejo convencional tuvieron más alto contenido de potasio para ambas épocas; en este sentido el potasio se halla en la mayoría de los suelos en cantidades relativamente grandes. Su contenido como (K_2O) varía de 0,5 a 3% y depende de su textura Blaya y García (2003). Teniendo en cuenta que los suelos de los agroecosistemas en estudio son arcillosos; por tanto el contenido de este elemento en general es alto para las seis fincas en estudio (IGAG, 1992).

FIGURA No 12: POTASIO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

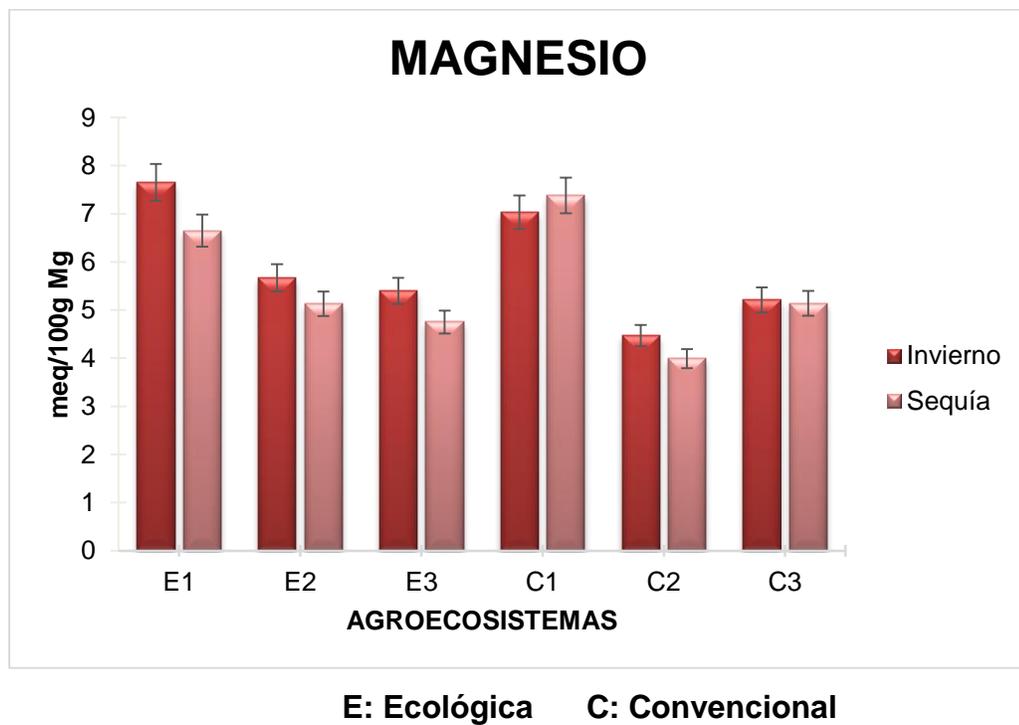
6.1.10.3. **MAGNESIO**

De acuerdo a la Tabla No 6 y la Figura No 13 el contenido de Mg no presentó diferencias significativas debido al manejo, sin embargo, se puede apreciar que el contenido de este elemento dio en promedio más alto para las fincas de manejo ecológico que las fincas con manejo convencional, posiblemente porque en las fincas ecológicas se utilizan prácticas agrícolas como el uso de enmiendas orgánicas (purines, compostaje, bocachi, etc.) que tienen como objetivo estimular la vida microbiana del suelo y la nutrición de las plantas. Igualmente estos materiales son ricos en macro y micro nutrientes (Pérez, 2008).

Igualmente se observa en la Tabla No 6 que este elemento no se presentó diferencias estadísticamente significativas por época de muestreo (invierno y sequía) lo cual indica que el contenido de este elemento no es afectado por la condición climática. Las concentraciones de Mg^{2+} en el complejo de cambio varían según el material parental, tipo de arcilla, la textura, presencia de otros cationes, la acidez, la lluvia, extracción por los cultivos y los aportes vía fertilización y

encalamiento. En este sentido, las deficiencias de Mg^{2+} tienden a ocurrir cuando los suelos son ácidos, arenosos, altamente lavados y con baja capacidad de intercambio catiónico (Havlin et al., 1999). Adicionalmente, la descomposición de la materia orgánica puede contribuir a la incorporación de este nutriente al suelo (Navarro y Navarro, 2003).

FIGURA No 13: MG EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).

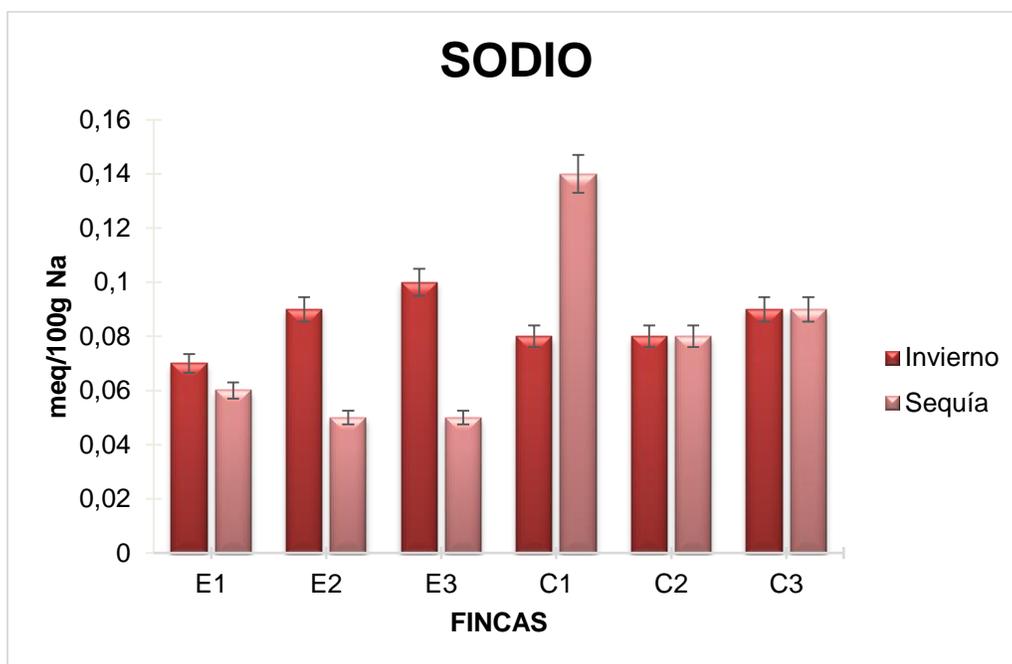


6.1.10.4. SODIO (Na)

De acuerdo con la Tabla No 6 y como se observa en la Figura No 14 el contenido de sodio no presentó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, en general el contenido de este elemento para las seis fincas en estudio fue adecuado ya que este no debe exceder 1meq/100g (SCCS, 1990). Sin embargo, como se observa en la Figura No 14 el contenido de este elemento se muestra más alto en las fincas convencionales respecto a las fincas de manejo ecológico. Lo que puede deberse a la aplicación de fertilizantes que aumentan el nivel de este elemento. Según Sadeghian, (2003) los cambios químicos generados en el suelo por el uso de los fertilizantes varían de acuerdo a la dinámica propia de cada elemento, la dosis y fuentes empleadas, los sistemas de aplicación y las características particulares del suelo y del clima, entre otros.

Como se observa en la Tabla No 6 el sodio arrojó diferencias estadísticamente significativas entre las dos épocas (sequía e invierno), siendo mayor el contenido de este elemento para la época de invierno, indicando que la circulación de agua y la regulación de la temperatura permiten la disponibilidad de este elemento debido a las precipitaciones. Gasca et al., (2010) indican que a medida que las condiciones físicas mejoran, el sodio se lava y es reemplazado por Ca^{+2} , dando como resultado la recuperación del suelo.

FIGURA No 14: SODIO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

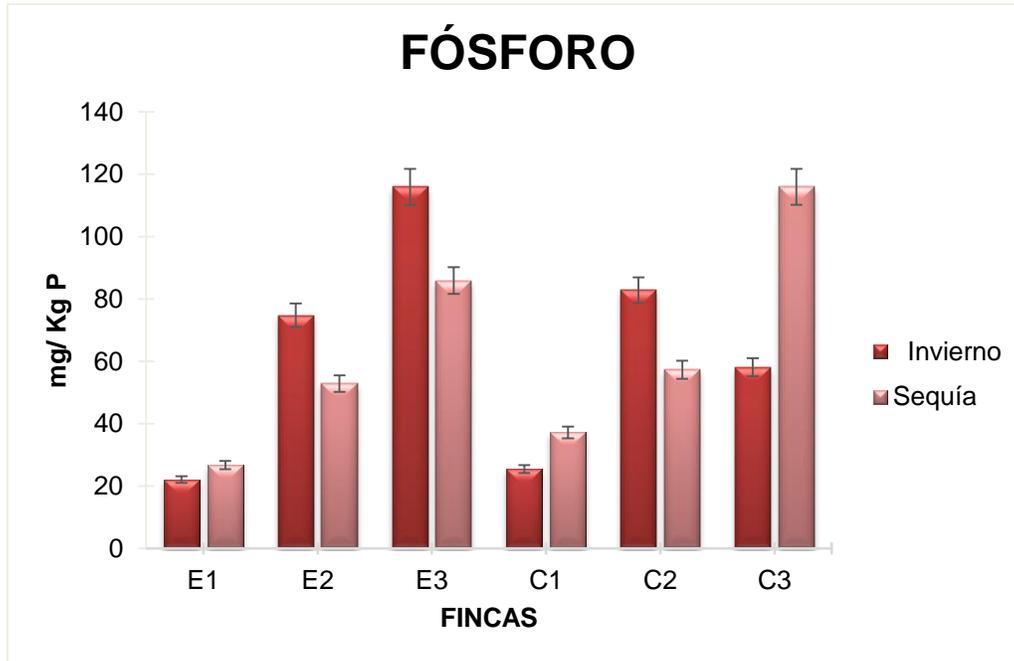
6.1.11. FÓSFORO

Como se puede apreciar en la Tabla No 5 el contenido de fósforo es alto para todas las muestras de estudio. Por otro lado, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas por el manejo, aunque el contenido de este elemento fue mayor en los agroecosistemas ecológicos. Lo cual puede atribuirse al alto contenido de materia orgánica, pues estudios realizados por Blaya y García (2003) indican que el fósforo orgánico suele ser mayor en las capas superficiales que en el subsuelo, debido a la acumulación de materia orgánica y a las formas insolubles como fosfatos retenidos en el humus o fijados fuertemente en las arcillas. Igualmente se encuentran mayores concentraciones de fósforo disponible en la capa superficial (0-10 cm) debido a la acumulación de residuos y a la aplicación superficial de fertilizantes fosfatados (Scheiner y Lavado, 1998; Calviño et al., 2000)

En cuanto a la época, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, el fósforo fue mayor en invierno con respecto a la época de sequía. Lo anterior puede estar relacionado con los procesos de difusión de iones fosfato en el suelo, los cuales son más rápidos en suelos húmedos o inundados que en suelos

secos, ayudan a proteger de la potencial fijación de fósforo y asegura que el P pueda ser reabastecido rápidamente a la solución de P del suelo tan pronto como las raíces depriman la concentración de iones fosfato en la solución (Snyder y Slaton, 2003).

FIGURA No 15: FÓSFORO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.1.12. ELEMENTOS MENORES

Se acostumbra llamar elementos menores u oligoelementos a aquellos que se requieren en cantidades muy pequeñas para el crecimiento de las plantas, como por ejemplo el B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn (SCCS, 1990). Según Cobo et al. (2013), la disponibilidad de los microelementos en el suelo depende de varios factores tales como: el pH, el contenido de materia orgánica, la actividad microbiológica, la textura del suelo, el potencial redox, el contenido de carbonato de calcio y las interacciones con otros macro y micronutrientes.

Manganeso (Mn): Como se puede observar en la Tabla No 7 el contenido de Mn fue deficiente para todas las muestras, además este elemento no presentó diferencias estadísticamente significativas por manejo, sin embargo, su disponibilidad fue

mayor en los agroecosistemas convencionales, lo cual contrasta con los resultados obtenidos por Roca (2007) quien considera que la distribución del Mn en el perfil del suelo está claramente asociada a la distribución de la materia orgánica en el perfil de suelo y a la profundidad; encontrándose los valores más altos siempre en superficie, debido a la fuerte afinidad por los complejos órgano-minerales que evitan su pérdida por lixiviación. Así mismo, Pegel et al., (1982) plantean que en los suelos ricos en arcillas, la insuficiencia de Mn es poco probable, ya que la elevada capacidad de intercambio catiónico de estos suelos preservan el Mn intercambiable del lavado. En cuanto a la época el manganeso no presentó diferencias estadísticamente significativas, aunque su disponibilidad fue mayor en época de invierno.

Hierro (Fe): Como se puede observar en la Tabla No 7 el contenido de Fe en los suelos estudiados fue superior en todas las muestras, por tanto se están presentando problemas de toxicidad. Este elemento no arrojó diferencias estadísticamente significativas por manejo, sin embargo su mayor disponibilidad se presentó en los agroecosistemas convencionales con respecto a los ecológicos. Igualmente no se generaron diferencias estadísticamente significativas en relación a la época, aunque su mayor disponibilidad se presentó en la época de invierno.

Zinc (Zn): Como se puede observar en la Tabla No 7 el contenido de zinc es superior en todas las muestras. El zinc no presentó diferencias estadísticamente significativas en relación al manejo, sin embargo, su mayor disponibilidad se presentó en los agroecosistemas ecológicos con respecto a los convencionales, lo anterior coincide con estudios realizados por Katial y Randhawa (1986) quienes plantean que los suelos de textura fina contienen y retienen mayor cantidad de Zn, pues un elevado porcentaje de arcilla facilita la fijación de los microelementos en los horizontes de acumulación. De otra manera existe información que indica que la deficiencia de este elemento reduce apreciablemente la cosecha y el crecimiento en cafetos. Por otro lado este elemento no arrojó diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la época, aunque su mayor disponibilidad se generó en la época de sequía, este comportamiento contrasta con lo reportado que indica que

los altos contenidos de aluviones mantienen buenos niveles de nutrimentos en las capas superficiales, haciéndolos altamente productivos.

Cobre (Cu): Como se puede observar en la Tabla No 7 el contenido de Cu en los suelos en estudio se encuentra dentro de los parámetros esperados para una óptima calidad del suelo. El cobre no arrojó diferencias estadísticamente significativas en cuanto al manejo, aunque la mayor disponibilidad de este elemento se presentó en los agroecosistemas ecológicos, lo cual coincide con lo reportado por Roca (2007) quien manifiesta que una escasa movilidad de cobre en las capas subsuperficiales puede estar relacionado con la textura arcillosa y el rango de pH de ligeramente ácido a neutro que permite un buen abastecimiento de cobre. Además, Molina y Menéndez (2002) plantean que el Cu rara vez presenta niveles bajos en los suelos, a menos que sean muy arenosos y bajos en materia orgánica. Así mismo, este elemento no generó diferencias estadísticamente significativas en relación a la época, sin embargo su mayor disponibilidad se presentó en la época de invierno. Por otro lado, la baja disponibilidad de cobre puede deberse a que este se encuentre atrapado en las estructuras cristalinas, o bien, adsorbido en los coloides del suelo sin posibilidad de disponibilidad para las plantas (Roca, 2007).

6.2. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS DE LOS SUELOS EN ESTUDIO

En la Tabla No 8 se observa que cuatro de las actividades enzimáticas analizadas presentaron diferencias estadísticamente significativas con relación al manejo (ecológico y convencional) y la época en los suelos de estudio; a diferencia de la actividad enzimática proteasa en donde no se observaron diferencias estadísticamente significativas. A continuación se desarrollarán los resultados de manera detallada para cada una de las enzimas.

TABLA No 8: PROMEDIO DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS DE SUELOS EVALUADOS EN AGROECOSISTEMAS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES DE ANOLAIMA, CUNDINAMARCA.

FACTORES EVALUADOS		β - GLUCOSIDASA	FOSFATASA ACIDA	FOSFATASA ALCALINA	UREASA	PROTEASA
MANEJO	ECOL	785,4 a	1049,4 a	795,9 a	21798,4 a	72,3 a
	CONV	492,8 b	783,9 b	370,0 b	16379,2 b	61,0 a
ÉPOCA	INV	554,9 a	694,2 a	237,4 a	13725,3 a	71,2 a
	SEQUIA	723,4 a	1139,1 b	928,5 b	24452,3 b	62,2 a

Letras iguales: No tiene diferencia estadística significativa

Letras diferentes: Tiene diferencia estadística significativa.

ECO: Ecológica, CON: Convencional, INV: Invierno, SEQ: Sequía.

6.2.1. UREASA

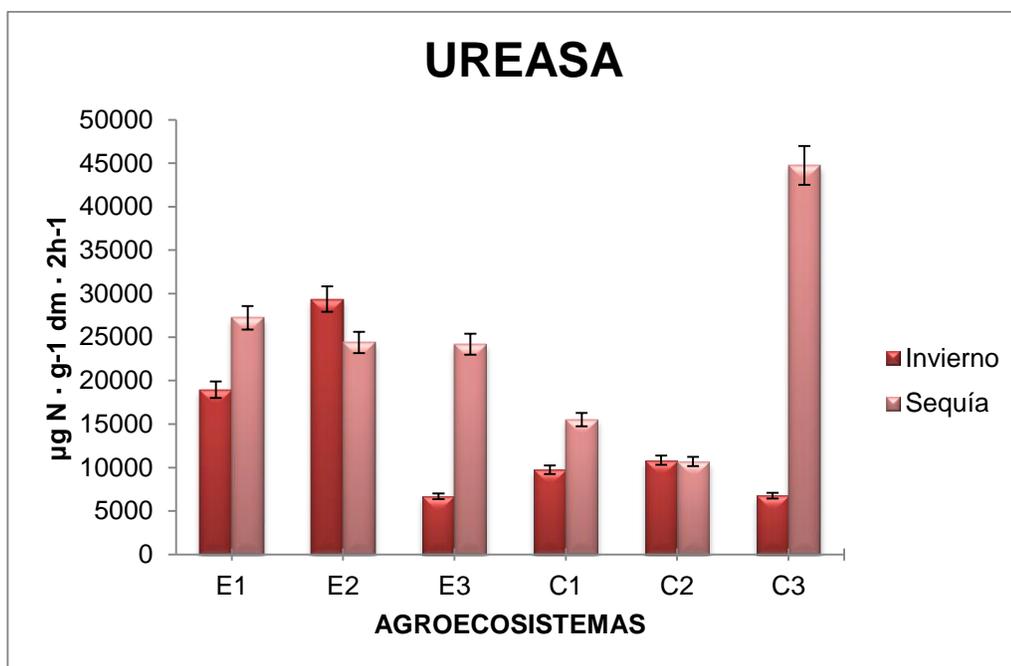
Como se puede observar en la Tabla No 8 la actividad ureasa para los suelos de estudio fue mayor estadísticamente en las muestras con manejo ecológico con respecto a las convencionales. Esto indicaría que la fertilización química, la presencia de plaguicidas y las prácticas de manejo convencional están generando un nivel de inhibición sobre la actividad de la enzima ureasa, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Dick *et al.*, (1988) quienes mostraron que la actividad ureasa y amidasa disminuyó con el aumento de la aplicación de fertilizantes a base de amoníaco. La adición del producto final de la reacción enzimática (NH_4^+) suprimió la actividad de las enzimas (Bandick y Dick, 1999).

Además hay mayor activación de la enzima ureasa en los sistemas de manejo ecológico debido a las prácticas de conservación de suelos, al empleo de abonos orgánicos y de coberturas permanentes que inciden en un mejor funcionamiento del ciclo del nitrógeno para estas muestras, estos resultados coinciden con los de Contreras, et al., (2008) quienes compararon el tipo de labranza conservacionista y la convencional, donde demostraron y confirmaron que las prácticas de labranza conservacionista, permite una mayor actividad de la enzima ureasa, a lo largo del ciclo del cultivo, esto debido al contenido de materia orgánica de reserva que favorece el mantenimiento de los niveles de dicha enzima en el suelo.

Así mismo, los resultados de este trabajo son similares a los reportados por Pascual et al., (2002) quienes observaron que 360 días después de haber efectuado una enmienda orgánica en suelos de huerta aún persistía el incremento de la actividad ureasa. En esta misma línea, la sucesión ecológica vegetal, tanto la natural como la que provoca el barbecho en las rotaciones, está correlacionada positivamente con la actividad ureasa (García et al., 1999). Además, la dinámica de la actividad ureasa, mostró un incremento evidente durante los primeros siete días de incubación, como consecuencia del suministro de fuentes carbonatadas de fácil degradación y de nutrientes disponibles que favorecen el desarrollo de los microorganismos y a su vez la síntesis de la enzima ureasa Contreras, et al. (2011).

En el presente estudio también se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la actividad ureasa entre épocas como se muestra en la Tabla No 8 y la Figura No 16, siendo mayor en época de sequía con respecto a la época de invierno, lo que puede estar relacionado con que la actividad de esta enzima se ve afectada por el contenido de agua, temperatura, pH y capacidad buffer, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y compuestos nitrogenados (Salamanca, 2008), además estos resultados coinciden con estudios que sugieren que la actividad de la ureasa aumenta con el aumento de temperatura, esto puede ser atribuido a que a medida que aumenta la temperatura del suelo, la ureasa también aumenta su actividad (Moyo et al.,1989).

FIGURA No 16: ACTIVIDAD UREASA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.2.2. PROTEASA

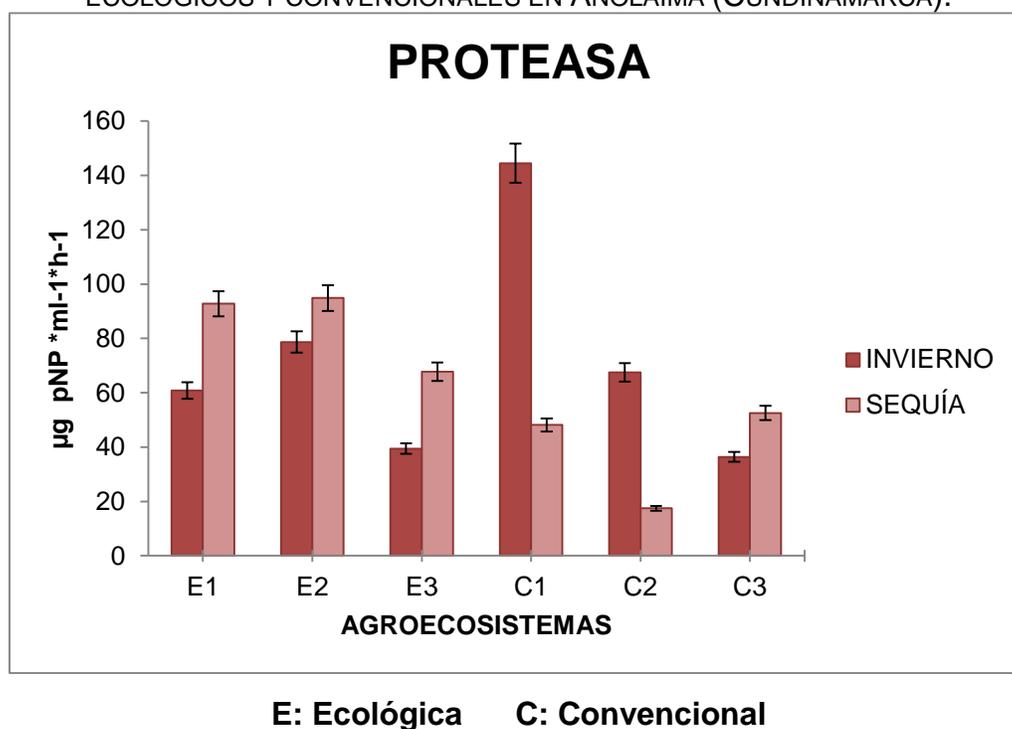
La actividad de la proteasa no arrojó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, sin embargo como se puede observar (Tabla No 8) para las fincas ecológicas esta actividad se muestra más alta respecto a las fincas de manejo convencional. Como posible explicación se puede decir que en estas fincas hay una mayor entrada de residuos vegetales debido al abonamiento orgánico y la cobertura permanente de los suelos permitiendo que haya una cierta proporción de proteínas cuya hidrólisis es catalizada por las proteasas, estimulando el desarrollo de las microbiotas y por lo tanto la producción de esta enzima (Paolini, 2003).

En este sentido Alvear et al, (2006) afirman que la actividad proteasa del suelo es la responsable de la descomposición progresiva del N contenido en las proteínas; procede de diferentes tipos de microorganismos, de residuos de las plantas y de la meso fauna del suelo. Por tanto la actividad puede ser menor en las fincas convencionales debido a que de los factores que pueden afectar las actividades enzimáticas del suelo tienen notable importancia la especie vegetal cultivada, el

manejo agrícola y el uso de enmiendas (Burns, 1982; Acosta y Tabatabai, 2000; Ahmad et al., 2001 citado por Avellaneda *et al.*, 2012). Al respecto González y Carballas, (1995) citados por Ochoa *et al.*, (2007) indican que las actividades enzimáticas se inhiben directamente, y los microorganismos reducen la tasa de producción de enzimas, en presencia de exceso de producto (nutrientes en forma oxidada), en este caso, fertilizantes inorgánicos, utilizados ampliamente en sistemas agrícolas convencionales.

En cuanto al efecto de la condición climática al momento de muestreo la actividad de la proteasa no arrojó diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, como se observa en la Figura No 17 el valor de la actividad proteasa es mayor en época de sequía.

FIGURA NO 17: ACTIVIDAD PROTEASA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



6.2.3. FOSFATASA ÁCIDA

Como se puede observar en la Tabla No 8 la fosfatasa ácida presentó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, siendo mayor en el manejo ecológico con respecto al manejo convencional. De acuerdo con Yoshioka et al. (2006) este comportamiento de la fosfatasa ácida en los sistemas de manejo ecológico puede relacionarse con el origen de la materia orgánica constituida por residuos frescos provenientes de los cultivos de la zona de estudio, ya que una tasa de entrada de residuos más alta trae como consecuencia un mayor desarrollo de los microorganismos (Kirshmann, Eklund, 1994) y por ende una mayor producción de enzimas (Bandick y Dick, 1999).

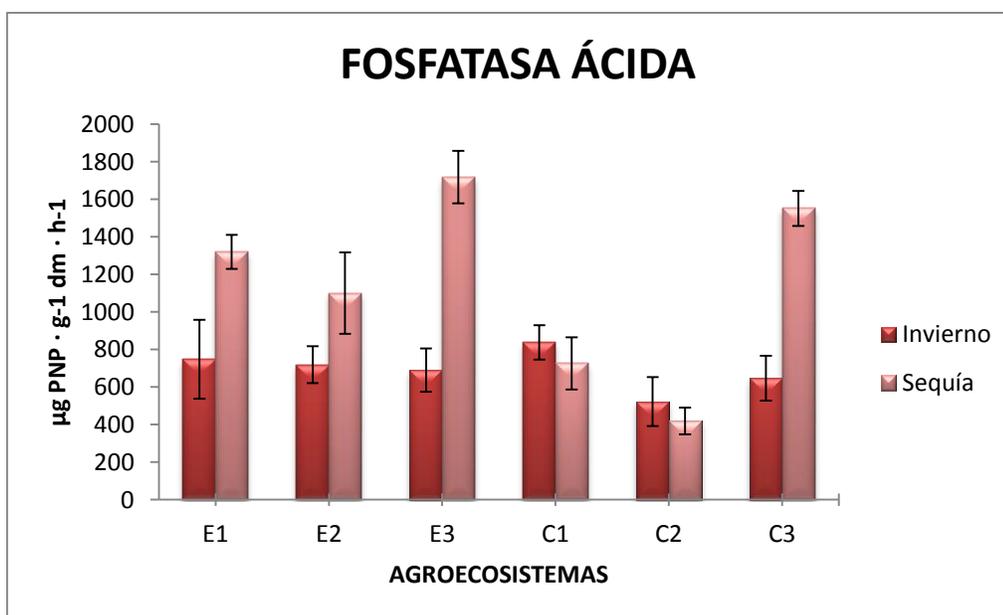
Así mismo, los resultados de este estudio coinciden con los reportados por Oberson et al. (1996) quienes encontraron que la actividad de las fosfatasas ácidas fue mayor en suelos bajo cultivo ecológico y biodinámico que en los de manejo convencional, debido a que la incorporación de materia orgánica al suelo trae consigo la mineralización del fósforo orgánico, promoviendo así el ciclo biogeoquímico de dicho elemento (Quenum, 2010). Igualmente, estos resultados son similares a los obtenidos por Toledo et al. (2004), en los cuales la actividad de fosfatasa ácida fue mayor en suelos cubiertos con pradera con altos contenidos de materia orgánica, tanto en época de lluvias como en sequía, además encontraron que los promedios más altos de la actividad de la fosfatasa ácida están influenciados por la actividad microbiana, la cantidad de sustratos disponibles, la humedad del suelo en los procesos biológicos (Ch et al., 2007) los cultivos, las prácticas de manejo y los sistemas de producción.

En contraste, la menor actividad encontrada corresponde al manejo convencional, lo cual puede estar relacionado con el uso de herbicidas, urea y agroquímicos en general, lo cual es apoyado en estudios realizados en Alfisoles donde se obtuvieron mayores valores de fosfatasa ácida en el tratamiento sin aplicación de fertilizantes, que con los tratamientos de arroz y en la arrocera en descanso con la pastura natural, que fueron fertilizadas con fósforo, ya que dichos aportes realizados a estos tratamientos habrían restringido la actividad enzimática al aumentar el P para los cultivos. Li et al. (1997) mencionaron que las fosfatasas ácidas son enzimas

adaptativas influenciadas por la demanda de P de las plantas y con actividad inversamente relacionada con el P del suelo. Lo anterior difiere de los estudios realizados por Olander y Vitousek (2000) quienes plantean que las adiciones de nitrógeno incrementan la actividad de la fosfatasa ácida, ya que la actividad de la enzima, depende de las fuentes de energía rápidamente degradables y del nitrógeno del suelo, atribuyéndosele a éste, un efecto positivo sobre el incremento de la síntesis proteína fosfatasa llevada a cabo por los microorganismos del suelo y las plantas (Olander y Vitousek, 2000).

De otra parte, como se puede observar en la Tabla No 8 y en la Figura No 18 la actividad de la enzima fosfatasa ácida presentó diferencias estadísticamente significativas entre épocas de muestreo, siendo mayor en época de sequía con respecto a la época de invierno, lo cual contrasta con estudios que reportaron la mayor actividad de fosfatasa ácida en época de invierno, a diferencia de la ureasa, la cual tuvo mayor actividad en verano, lo que está relacionado con que los niveles de actividad de fosfatasa ácida son mayores en invierno, debido al pH más ácido, situándose dentro del rango óptimo de pH para la actividad de esta enzima, y con un mayor contenido de humedad (Criquet et al., 2004).

FIGURA No 16: ACTIVIDAD FOSFATASA ÁCIDA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



6.2.4. FOSFATASA ALCALINA

Como se puede observar en la Tabla No 8 y en la Figura No 19 la actividad de la fosfatasa alcalina presentó valores de 87, 544 $\mu\text{g PNP}\cdot\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ a 1718,23 $\mu\text{g PNP}\cdot\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$, niveles que se encuentran en el ámbito reportado por Paul y Clark (2007). Además esta enzima arrojó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo reportando su mayor actividad en el sistema de manejo ecológico, con respecto al convencional, lo que permite afirmar que las prácticas de conservación de suelos, al empleo de abonos orgánicos y de coberturas permanentes empleadas en los agroecosistemas ecológicos inciden en un mejor funcionamiento del ciclo del fósforo para estas muestras, estos resultados son similares a los de Fliebbach et al. (2007) quienes encontraron que la estrategia de manejo orgánico promueve la sostenibilidad de los suelos agrícolas y tiene mayores efectos sobre la actividad de las enzimas en comparación con el manejo convencional. Así mismo, otros autores (Reganold et al., 1987; Albiach et al., 1999; Albiach., 2001; Gómez, 2001; Parham et al., 2002; Melero, 2005; Quenum et al., 2008b) coinciden con los resultados de este estudio y demuestran el efecto positivo sobre la fosfatasa alcalina que presenta la producción ecológica (frente a la producción convencional), o bien la aplicación de productos orgánicos en la fertilización de los cultivos (Quenum, 2010).

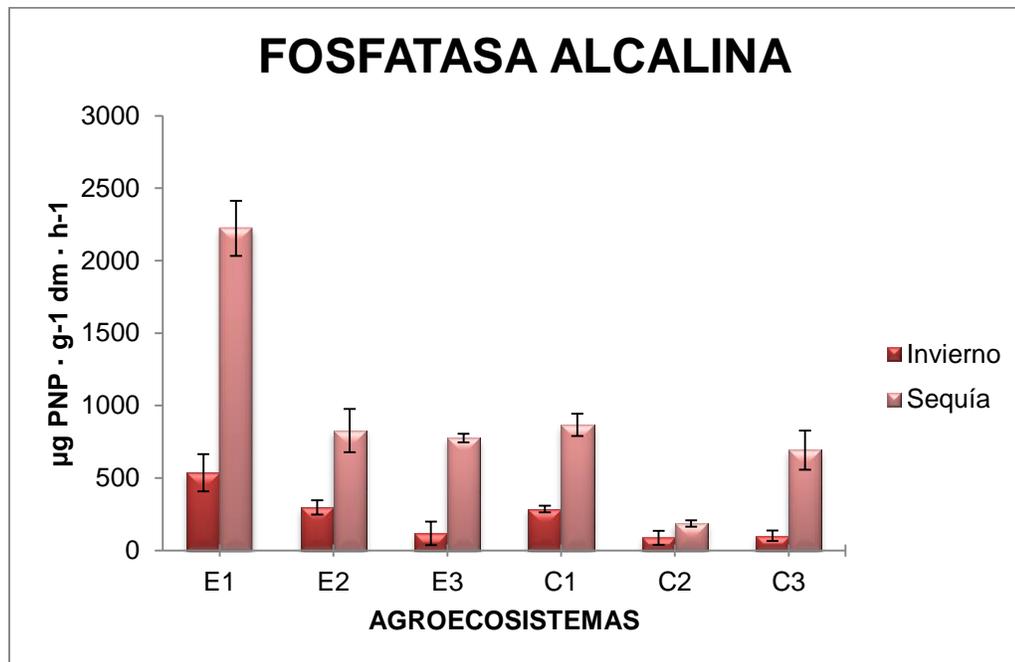
En contraste estudios realizados por Merini et al. (2007) plantean que aunque el manejo convencional afecta la calidad del suelo, parece tener efectos iguales o posiblemente ligeramente mayores sobre las actividades enzimáticas, lo que podría explicarse por el hecho de que los suelos con una historia de uso de agroquímicos, tienen una gran capacidad intrínseca de degradación de agroquímicos debido a sus adaptaciones microbianas. Estudios similares realizados por Yoshioka et al. (2006) difieren de los resultados obtenidos, reportando una mayor actividad de fosfatasa alcalina en el manejo químico, y

menor para los manejos tradicional y orgánico, lo que se asocia con la mayor actividad de los microorganismos como gasto energético, pues el comportamiento de esta enzima está relacionado con la actividad de bacterias y hongos del suelo (Criquet et al., 2004; Dick, 1997), que conlleva a un metabolismo acelerado que se refleja en la actividad enzimática (Sánchez, 2003).

De acuerdo con Zamora et al. (2005) los valores bajos de la fosfatasa podrían estar relacionados a una alta disponibilidad del fósforo en los suelos de sistemas agrícolas, considerando que los mecanismos enzimáticos, especialmente los de la fosfatasa, se ven inhibidos cuando existe una mayor disponibilidad de nutrientes en forma lábil en el suelo, además las prácticas de fertilización, especialmente los fertilizantes fosfatados podrían suprimir a largo plazo la segregación de enzimas solubilizantes del fósforo orgánico.

Como se puede apreciar en la Tabla No 8 y la Figura No 19 la actividad de la fosfatasa alcalina tuvo diferencias estadísticamente significativas entre épocas, siendo mayor en época de sequía. Lo cual puede estar relacionado con que la sombra tiene la función de generar satisfactores y reciclar nutrimentos, como han reportado Ann (1993), Barrios et al. (1994), Wilken, citado por Barrera, Zinck (2000). Ruiz (1978) Villaseñor (1987) quienes también afirman que entre el café, el plátano y la sombra existe competencia por agua y nutrimentos. Además la influencia de la posición de la pendiente tiende a crear condiciones ambientales en el suelo que pueden afectar la estructura y función de comunidades microbianas y la actividad de enzimas hidrolíticas.

FIGURA No 17: ACTIVIDAD FOSFATASA ALCALINA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.2.5. β -GLUCOSIDASA

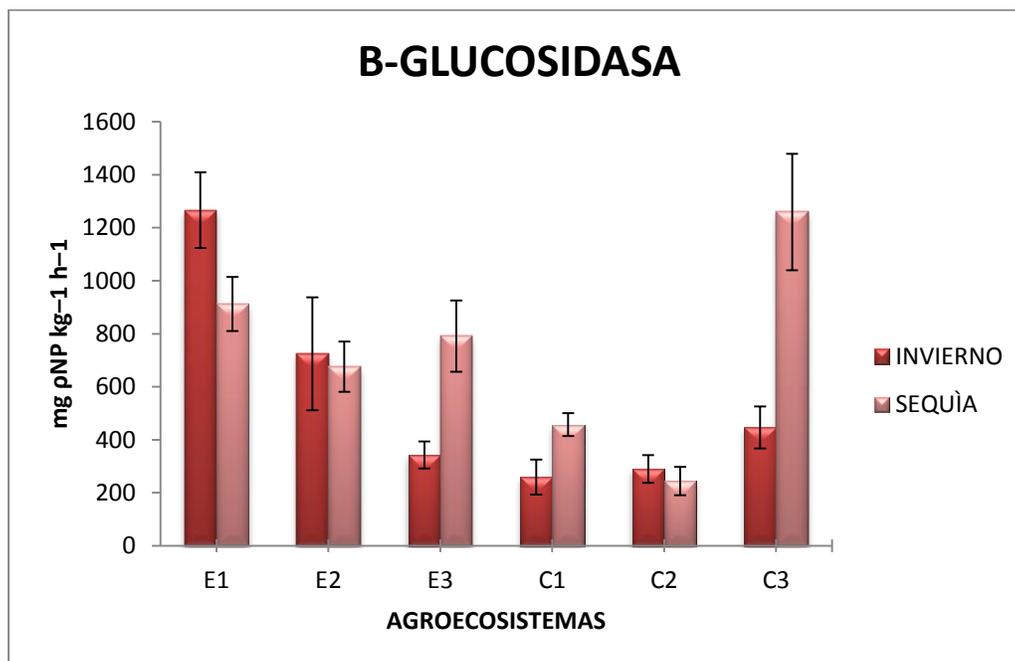
La actividad β -glucosidasa fue estadísticamente mayor en los agroecosistemas ecológicos frente a los convencionales. Debido a que las actividades enzimáticas son sensibles a la aplicación de herbicidas (Alvear *et al.*, 2006), y los microorganismos reducen la tasa de producción de enzimas, en presencia de exceso de fertilizantes inorgánicos (González *et al.*, citado por Ochoa *et al.*, 2007), posiblemente esto pueda estar afectando la actividad de β -glucosidasa negativamente.

Así mismo la β -glucosidasa es una enzima muy sensible a los cambios en el pH, y las prácticas de manejo de suelos (Acosta y Madejon *et al.*, 2001 citado por Das y Varma, 2011), esto es coherente con el pH de los agroecosistemas ecológicos y las diferentes prácticas de manejo como la cero labranza y el no uso de maquinaria pesada. Estos resultados son similares a los presentados en un estudio

por Mijangos *et al.*, (2006) citado por Ochoa *et al.*, (2007) quienes encontraron, una mayor actividad para la deshidrogenasa, la β -glucosidasa y la arilsulfatasa en aquellas parcelas donde había un laboreo mínimo frente al laboreo convencional.

La actividad de la β -glucosidasa no presentó diferencias estadísticamente representativas en cuanto a época de muestreo (invierno y sequía). Esto puede ser debido a que en estos agroecosistemas en general se manejan practicas campesinas como el policultivo y el sombrío; por tanto el acolchado de la superficie del suelo reduce las oscilaciones de temperatura, manteniéndolo fresco, manteniendo la humedad del suelo durante las estaciones calurosas y secas, y la promoción de la actividad microbiana y el desarrollo del cultivo (Souza *et al.*, 2003 citado por García *et al.*, 2010).

FIGURA No 18: ACTIVIDAD β - GLUCOSIDASA EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



E: Ecológica C: Convencional

6.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) ACTIVIDADES ENZIMATICAS POR ÉPOCA Y MANEJO

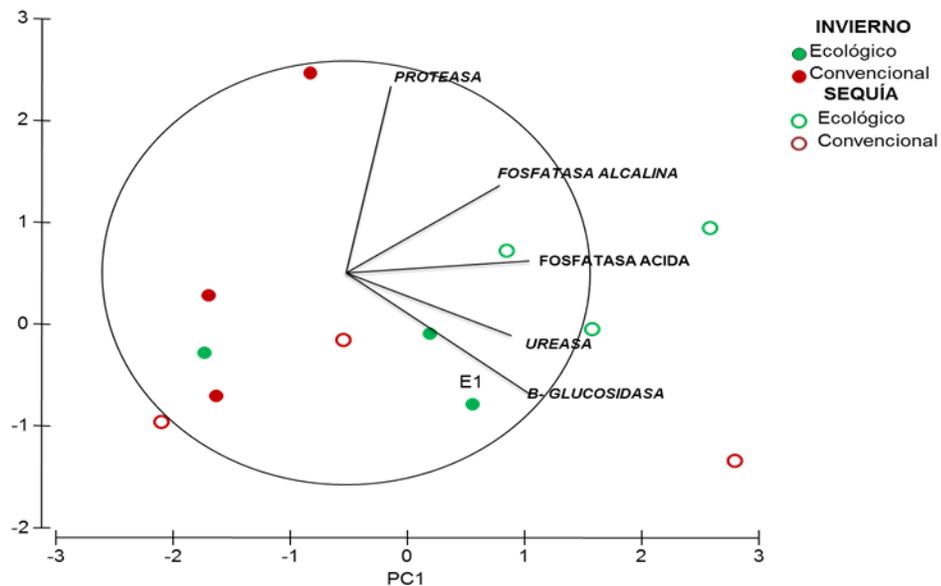
Los dos primeros ejes del análisis de componentes principales definieron el 79,3% de la varianza acumulada lo que permite inferir que la gráfica es de buena calidad (Ver anexo No 1). Por otra parte, teniendo en cuenta el primer eje las actividades enzimáticas hidrolasas (ureasa, fosfatasa ácida, fosfatasa alcalina y β - glucosidasa) mostraron una alta correlación positiva entre sí, lo cual indica que son buenos indicadores de calidad edáfica y sugiere un equilibrio entre los principales nutrientes, en tanto que la actividad de la enzima proteasa, es la que menos información aporta al sistema. El segundo eje señala que las actividades enzimáticas que tienen mayor correlación son la ureasa y la β -glucosidasa, esto puede deberse a una mayor disponibilidad de compuestos orgánicos de nitrógeno y un enriquecimiento del suelo con materiales frescos de naturaleza celulítica, los cuales actúan como sustratos para estas enzimas (Pajares et al., 2010).

Como se puede observar en la Figura No 21 en cuanto al manejo, existe una tendencia hacia los agroecosistemas ecológicos, en los cuales se presentan mayores actividades enzimáticas, esto puede atribuirse al rizodepósito de sustancias orgánicas por plantas cultivadas y a la mayor disponibilidad de compuestos orgánicos producto de la incorporación de cobertura vegetal y de insumos orgánicos como abonos y residuos de cosecha. Por otro lado solo dos de los agroecosistemas convencionales correlacionaron con las actividades enzimáticas, lo anterior puede estar asociado a que estos agroecosistemas son convencionales de tipo campesino, es decir que emplean prácticas como las coberturas permanentes que ayudan a atenuar las diferencias, sin embargo al igual que en los demás agroecosistemas convencionales las actividades enzimáticas fueron menores con respecto a los agroecosistemas ecológicos, lo que puede estar relacionado con el uso de herbicidas, plaguicidas, fungicidas y

fertilizantes de síntesis química, los cuales están inhibiendo la actividad de estos indicadores bioquímicos de calidad del suelo.

En cuanto a la condición climática, se puede observar que la tendencia es a aumentar hacia la época de sequía, en la cual las se presentan mayores actividades enzimáticas, lo que indica que éstas se ven beneficiadas por las altas temperaturas, la poca precipitación y la restricción hídrica. Así mismo, algunos agroecosistemas (2 convencionales y 1 ecológica) son sensibles al estrés hídrico del verano y se ven favorecidos por la época de lluvias, aunque esta condición no aumento los niveles de las actividades enzimáticas.

Figura No 19: Análisis ACP correlación de actividades enzimáticas por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca).

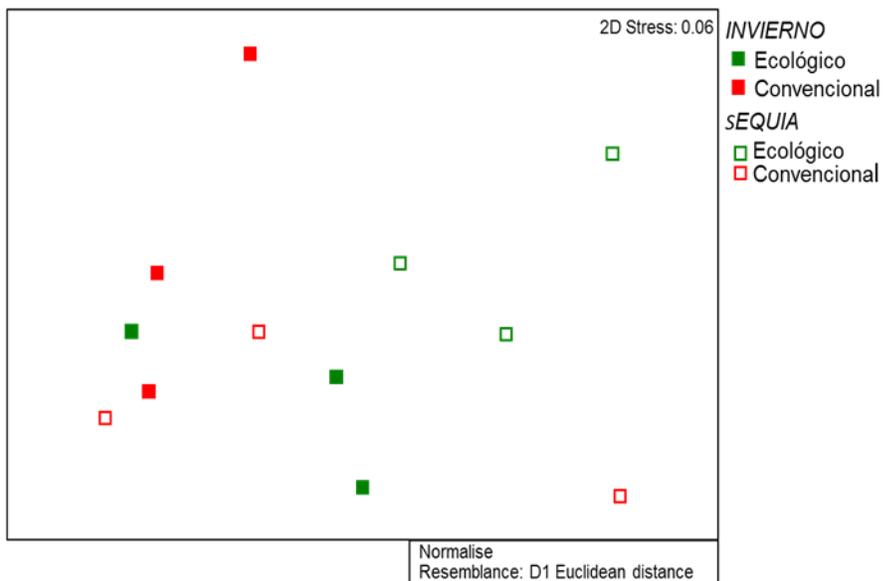


6.4. **ESCALAMIENTO NO MÉTRICO MULTIDIMENSIONAL (MDS)** **ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS POR ÉPOCA Y MANEJO**

Como se puede observar en la Figura No 22 existe un criterio importante de agrupación con relación a los sistemas de manejo, lo que permite confirmar con los resultados obtenidos en el análisis univariado (Tabla No 8.) que existen diferencias estadísticamente significativas con relación al manejo, presentándose mayores actividades enzimáticas en los agroecosistemas ecológicos, lo que permite inferir que el empleo de insumos orgánicos y coberturas permanentes está beneficiando la actividad de las enzimas hidrolíticas, y favoreciendo el reciclaje de los principales nutrientes (N, P y C) en estos suelos. Según Christensen, (1996) la gestión agrícola influye en los microorganismos del suelo y los procesos microbianos del suelo a través de los cambios en la cantidad y calidad de los residuos vegetales que entran en el suelo, su distribución espacial y mediante cambios en el aporte de nutrientes y cambios físicos. Por otra parte los agroecosistemas convencionales en general tienden a agruparse del lado opuesto al de los agroecosistemas ecológicos, es decir que las prácticas de manejo convencional como el uso de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes de síntesis química, están inhibiendo las actividades enzimáticas en dichos agroecosistemas, lo que además podría entenderse como un indicador temprano a los cambios que se están presentando en el suelo de continuar con estas prácticas agrícolas. Como lo indican Norgaard y Sikor (1999) quienes afirman que los agroquímicos producen impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas. Así mismo Rosset, (1997) indica que la agricultura convencional provoca la disminución de la fertilidad y compactación de suelos; disminución de materia orgánica y la biodiversidad asociada a ella.

Otro criterio importante de agrupación es la época, ya que existe una tendencia de agrupación en la época de sequía, lo cual coincide con el análisis univariado (Tabla No 8.) el cual arrojó diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la época, presentándose mayores actividades enzimáticas en sequía, es decir que estos indicadores bioquímicos son sensibles a la variabilidad climática, y se ven favorecidos por las bajas precipitaciones y las altas temperaturas.

FIGURA No 20: ANÁLISIS MDS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS POR ÉPOCA Y MANEJO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).

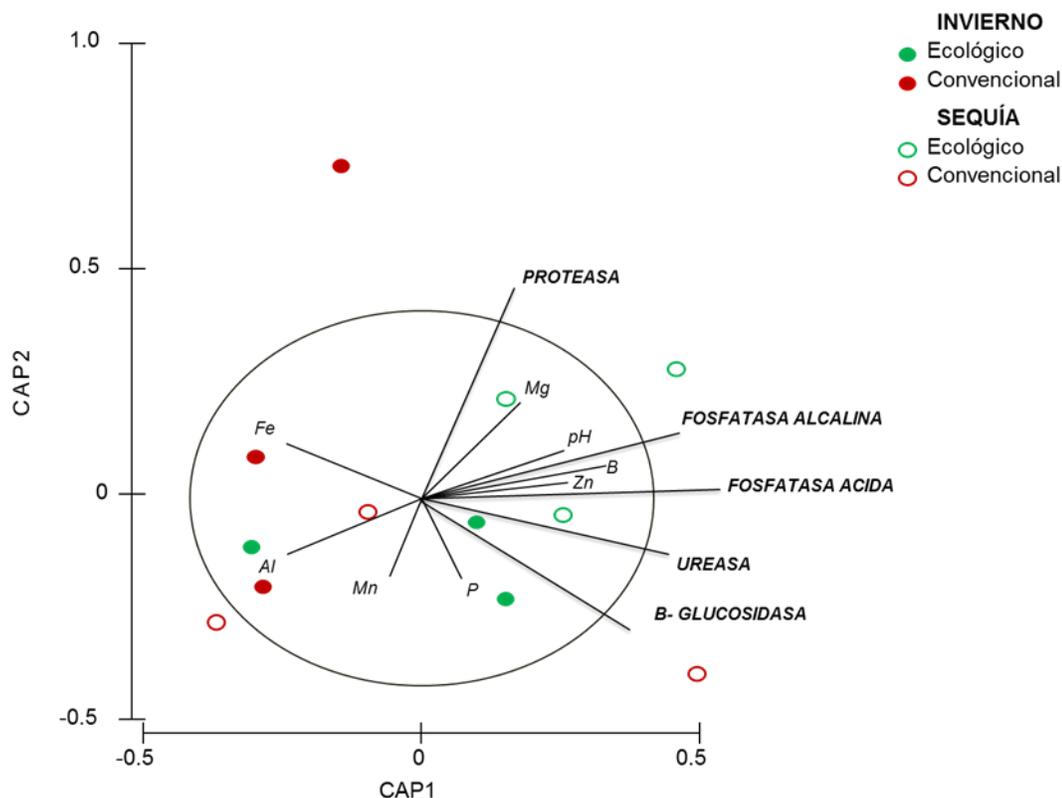


6.5. ANÁLISIS CANÓNICO DE COORDENADAS PRINCIPALES CAP ÉPOCA - MANEJO - PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

Como se puede observar en la Figura No 23 las actividades enzimáticas de los agroecosistemas ecológicos, presentan relaciones con el magnesio, el pH, el boro, el zinc y el fósforo, indicando que para los agroecosistemas ecológicos los parámetros anteriormente mencionados favorecen las actividades enzimáticas, mientras que los agroecosistemas convencionales muestran relaciones con el hierro, la acidez intercambiable y el manganeso, lo cual sugiere que las actividades enzimáticas tienen algún vínculo con los parámetros anteriormente nombrados y con las prácticas que emplean los agroecosistemas convencionales.

En cuanto a las épocas de muestreo se observa que las actividades enzimáticas correlacionan con el fósforo, el manganeso, la acidez intercambiable y el zinc en temporada de lluvias, lo que puede deberse a que las altas precipitaciones que se presentan favorecen la disponibilidad de dichos elementos en el suelo. Con respecto a la época de sequía se puede observar que los parámetros químicos que correlacionaron con las actividades enzimáticas fueron: el zinc, el boro, el pH y el magnesio, lo cual indica que las altas temperaturas generan condiciones que benefician las relaciones entre dichos parámetros y las actividades enzimáticas.

Figura No 21: Análisis CAP correlación de actividades enzimáticas y parámetros fisicoquímicos por época y manejo en suelos de agroecosistemas cafeteros ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca)



6.6. ANÁLISIS CANÓNICO DE COORDENADAS PRINCIPALES CORRELACIÓN ENTRE LAS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS, Y LAS PUNTUACIONES DE LA RESILIENCIA DE LOS AGROECOSISTEMAS DE ESTUDIO.

Como se puede observar en la Figura No 24 las actividades enzimáticas de los agroecosistemas ecológicos correlacionaron con las variables que hacen referencia a la de compra de insumos, lo que significa que el hecho de no comprar ni requerir de estos insumos externos les otorga una puntuación alta en cuanto a términos de resiliencia. Igualmente, variables como: el uso de plaguicidas, uso de herbicidas, depende de plaguicidas y abonos externos, que también correlacionaron con las actividades enzimáticas de los agroecosistemas ecológicos, hacen referencia a que las prácticas de no uso de

fertilizantes de síntesis química que emplean estos agroecosistemas les otorga altas puntuaciones de resiliencia y favorece las actividades enzimáticas en los suelos de los mismos.

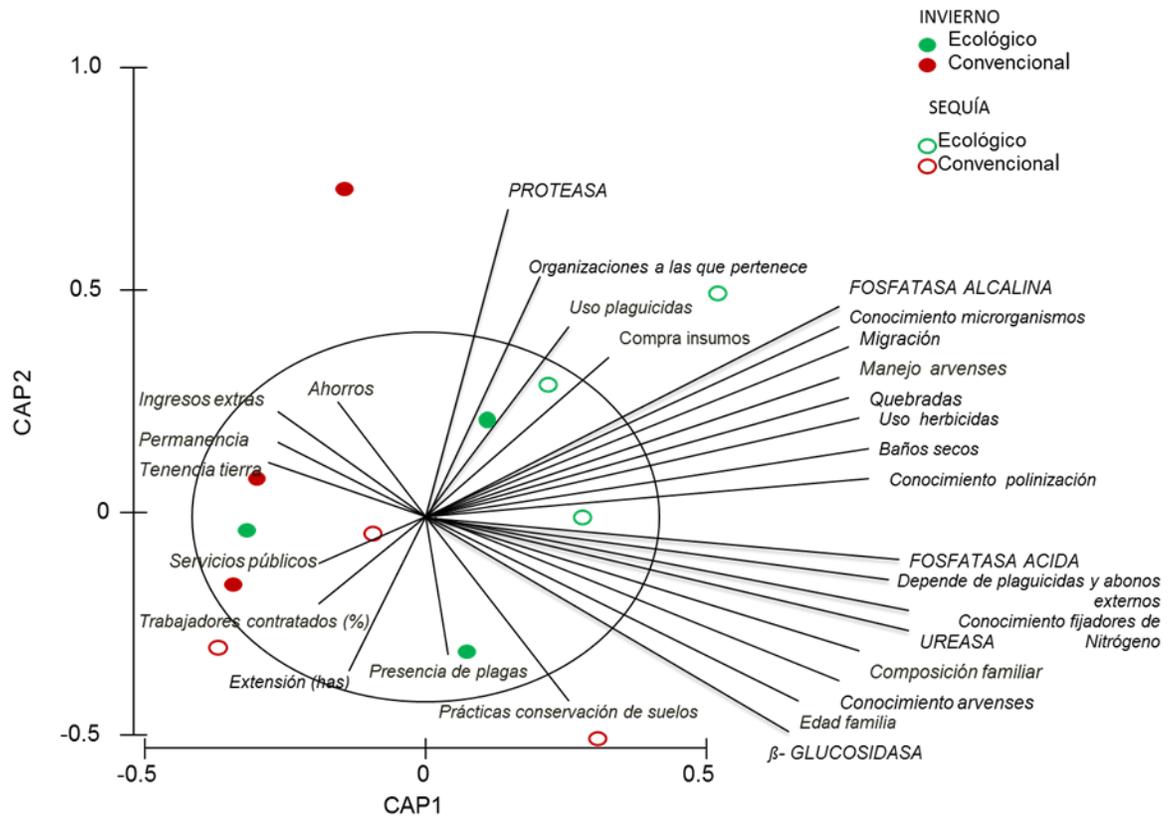
Asimismo las actividades enzimáticas de los agroecosistemas ecológicos tuvieron relaciones con el hecho de que los agricultores de las fincas ecológicas pertenezcan a algún tipo de organización, lo cual puede estar influenciando otras variables que aumentan las puntuaciones de resiliencia en los agroecosistemas ecológicos como los son: las prácticas de conservación de suelos que emplean los campesinos, el manejo de arvenses, los conocimientos de polinización, microorganismos y fijadores de nitrógeno, lo que guarda una estrecha relación con los altos contenidos de sustratos nitrogenados, y con el origen del material orgánico. De igual manera la baja presencia de plagas en estos agroecosistemas se debe a que emplean la biodiversidad como estrategia de manejo de insectos y agentes de enfermedades, lo que favorece las altas actividades enzimáticas y puntuaciones de resiliencia en los mismos.

Por otro lado, las actividades enzimáticas de los agroecosistemas convencionales muestran relaciones con las variables: ahorros, ingresos extras ya que los campesinos de estos agroecosistemas dependen económicamente de otras actividades como la piscicultura, servicios públicos puede ser atribuido a que uno de los agroecosistemas convencionales no los posee, lo cual le otorga una baja puntuación de resiliencia, % de trabajadores contratados en estos agroecosistemas puede estar vinculado con la necesidad de fertilización y laboreo del suelo, y por último se puede observar relación con la extensión de los agroecosistemas convencionales ya que dos de las fincas convencionales poseen mayor extensión con respecto a las demás, lo que las hace más resilientes.

Con relación a las épocas de muestreo, se puede observar que no existe una tendencia definida, aunque en época de sequía se puede evidenciar que hay correlación con las prácticas de conservación de suelos, lo cual puede estar relacionado con que la combinación de estas dos variables proporciona las

condiciones favorables para las actividades enzimáticas y hace que los agroecosistemas sean más resilientes. Por otra parte, la época de lluvias correlacionó con la variable de presencia de plagas, ya que a mayor precipitación mayor presencia de plagas en los agroecosistemas y por ende mayor afectación de las actividades enzimáticas y menor puntuación de resiliencia ante la variabilidad climática.

FIGURA No 22: ANÁLISIS CAP CORRELACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS Y PUNTUACIONES DE RESILIENCIA POR ÉPOCA Y MANEJO EN SUELOS DE AGROECOSISTEMAS CAFETEROS ECOLÓGICOS Y CONVENCIONALES EN ANOLAIMA (CUNDINAMARCA).



7. CONCLUSIONES

Los parámetros físicos químicos no reflejaron diferencias estadísticamente significativas debidas al manejo o a la época de muestreo.

Los parámetros químicos que detectaron diferencias estadísticamente significativas en relación al sistema de manejo fueron: N, CO y B, siendo en promedio mayores en los agroecosistemas ecológicos con respecto a los convencionales, lo cual indica que las prácticas de conservación de suelos, los abonos orgánicos y las coberturas permanentes empleadas en los agroecosistemas ecológicos están teniendo una influencia positiva en estos indicadores de calidad del suelo, en tanto que la utilización de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes de síntesis química en los agroecosistemas convencionales de estudio están generando un deterioro de estos indicadores en el suelo.

La actividad de la enzima ureasa arrojó diferencias estadísticamente significativas presentando su mayor actividad en los agroecosistemas ecológicos con respecto a los convencionales, lo cual indica que los insumos químicos como herbicidas y fertilizantes empleados en los sistemas convencionales inhibieron la actividad de esta enzima y por ende su influencia. Además se presentaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la época siendo mayor en la época de sequía con respecto a la de invierno, es decir que las altas temperaturas tienen una influencia favorable en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno.

La actividad de la proteasa no arrojó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de manejo, sin embargo se observa que para las fincas ecológicas esta actividad se mostró más alta respecto a las fincas de manejo convencional. Lo que pueda estar relacionado con el abonamiento orgánico y la cobertura permanente de los suelos que estimulen el desarrollo de las microbiotas y la producción de esta enzima. Por otro lado la actividad de esta enzima no presentó diferencias significativas en cuanto a la época de muestreo.

La actividad de la enzima fosfatasa ácida presentó diferencias estadísticamente significativas en cuanto al manejo siendo mayor en los agroecosistemas ecológicos con respecto a los convencionales, es decir que la ausencia de plaguicidas permite

mejores condiciones para la actividad microbiana y por ende enzimática. Así mismo se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas frente a la época presentándose mayor actividad de esta enzima en sequía con respecto a la época de invierno, lo que indica que las altas temperaturas y el sistema de manejo ecológico favorecen el ciclo biogeoquímico del fósforo.

La actividad de la enzima fosfatasa alcalina presentó diferencias estadísticamente significativas en cuanto al manejo siendo mayor en los agroecosistemas ecológicos con respecto a los convencionales. Además se presentaron diferencias estadísticamente significativas frente a la época generándose mayor actividad de esta enzima de sequía con respecto a la de invierno, lo que indica que la disminución de lluvias y el sistema de manejo ecológico favorecen al ciclo biogeoquímico del fósforo.

La actividad β -glucosidasa fue estadísticamente mayor en los agroecosistemas ecológicos frente a los convencionales. Posiblemente porque esta actividad es sensible a la aplicación de herbicidas y esto le pueda estar afectando negativamente, así mismo porque la aplicación de insumos orgánicos en las fincas ecológicas permite una mayor actividad biológica y por ende actividad de esta enzima. La actividad de la β -glucosidasa no presentó diferencias estadísticamente representativas en cuanto a época de muestreo (invierno y sequía).

La enzima que se comporta como mejor indicador bioquímico de calidad sobre los suelos asociados al cultivo de café es la fosfatasa ácida debido a que es sensible a los cambios generados por la gestión del manejo ecológico y convencional.

Los agroecosistemas ecológicos mostraron relaciones con el magnesio, el pH, el boro, el zinc y el fósforo, mientras que los agroecosistemas convencionales muestran relaciones con el hierro, la acidez intercambiable y el manganeso, indicando que los agroecosistemas en estudio tienen algún vínculo con los parámetros fisicoquímicos, ya que las diferentes prácticas ecológicas potencian un

mayor valor de las actividades enzimáticas; por otra parte las actividades enzimáticas también mostraron relación con las épocas de muestreo (invierno y sequía), lo cual indica que las variación climática genera condiciones que benefician las relaciones entre dichos parámetros y las actividades enzimáticas .

Los parámetros que determinan las puntuaciones de resiliencia ante la variabilidad climática que presentaron las mayores correlaciones con las actividades enzimáticas y en particular con los agroecosistemas ecológicos fueron: el conocimiento de los microorganismos, el no uso de plaguicidas y fertilizantes de síntesis química, la no dependencia de insumos externos, las prácticas de conservación de suelos y las organizaciones a las que pertenecen los campesinos.

Según la siguiente hipótesis planteada "Las actividades enzimáticas del suelo son modificadas por el manejo agrícola (ecológico y convencional) en los agroecosistemas cafeteros seleccionados en Anolaima, Cundinamarca", y de acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo observar que la hipótesis planteada es cierta, las actividades enzimáticas son alteradas por los sistemas de manejo, específicamente estas se ven favorecidas por el manejo ecológico, lo que permite recomendar en función de los parámetros físicos químicos y las actividades enzimáticas estudiadas, como mejor opción agronómica los sistemas ecológicos, para de esta manera garantizar a largo plazo un uso eficiente del recurso suelo y un menor grado de degradación y contaminación por el uso de insumos químicos.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios que involucren las actividades enzimáticas en agroecosistemas cafeteros, teniendo en cuenta variables como: las diferentes profundidades del perfil suelo y la edad de los cultivos.

Se sugiere realizar estudios similares en agroecosistemas ecológicos y convencionales que involucren más muestreos, en diferentes condiciones climáticas y distintas partes del país para poder contrastar con los resultados obtenidos.

Se recomienda evaluar los efectos a largo plazo de los diferentes sistemas de gestión agrícola sobre la actividad biológica del suelo y la fertilidad del suelo en estaciones experimentales de campo diferente con distintos factores ambientales principalmente humedad, pH y la textura del suelo.

Se recomienda efectuar trabajos similares relacionados con el nivel de ingresos, el valor agregado de los productos ecológicos y que permita a los campesinos ayudar a comprender si las prácticas agrícolas que emplean están contribuyendo a la calidad del suelo y a la productividad de los cultivos.

Se sugiere desarrollar estudios que permitan evaluar la habilidad de la actividad biológica para recuperarse en diferentes periodos de resiliencia, así mismo se recomienda determinar la capacidad que tienen las actividades enzimáticas en extraer metales pesados y otros contaminantes de los suelos.

9. BIBLIOGRAFÍA

Abreu, Z., Sarmiento, L., y Bottner, P. (2007). Destino del nitrógeno agregado por fertilización en un cultivo de papa en los andes de Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 24(2).

Acuerdo No.014 DE 2012 Anolaima Cundinamarca. 16 de Julio de 2012. En (http://www2.cundinamarca.gov.co/planeacion/redpec/entregasenlinea/municipios/ANOLAIMA/Plan-Desarrollo-2012-2015/ANOLAIMA_Caracterización-población-VCA.pdf). Hora: 16:30. Concejo Municipal de Anolaima

Albiach, R; Bonmatí, M; Canet, R; García C; García, A; Gil, F; González, M; Hernández, M; Jiménez, P; Leiros, C; Rad, C; Sastre, I; Trasar, C. (2006). Sobre las enzimas del suelo y sus técnicas de medida. *EDAFOLOGÍA*, VOL 13. (3), PP 117- 125.

Altieri, M. y Nicholls, C. (2000). Teoría y práctica para una agricultura sustentable. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental. PNUMA. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México, 235.

Altieri, M. (2002). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. SARANDON, SJ Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable. Buenos Aires–La Plata.

Altieri, M. A. (2009). El estado del arte de la agroecología: revisando avances y desafíos. Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones. Sociedad científica latinoamericana de agroecología (SOCLA).

Altieri, M. y Agroecología, M. (1999). Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: Nordan Comunidad.

Altieri, M. y Nicholls, C. (2002). Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agroecosistema de café. Universidad de California, Berkeley.

Altieri, M. y Nicholls, C. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*.

Altieri, M. y Toledo, V. (2011). La revolución agroecológica en Latinoamérica. Sociedad Científica Latinoamericana en Agroecología. SOCLA.

Alvarado, J.; Andrade, H.; Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) En el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 20-31.

Alvear, M.; Urra, C.; Huaiquilao, R.; Astorga, M.; y Reyes, F. (2007). Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(3), 38-50.

Alvear, M., Pino, M., Castillo, C., Trasar, C., y Gil, F. (2006). Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un alfisol del sur de Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(2), 38-53.

Alvear, M., López, R., Rosas, A., Espinoza, N. (2006). Efecto de la aplicación de herbicidas en condiciones de campo sobre algunas actividades biológicas. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(1), 64-76.

Anderson, G.; Traish, F.; Tharakan, P.; Tarrant, J.; Telingator, S.; Huet, H.; y Kim, K. (2007). Adaptación a la variabilidad y al cambio climático: un manual para la planificación del desarrollo.

Arzuaga, S.; López, C.; Dalurzo, H. y Vazquez, S. (2005). Fósforo total, fósforo orgánico y fosfatasa ácida, en entisoles, alfisoles y vertisoles de corrientes con diferentes usos agrícolas. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas Resumen A-066*. Pp, 1-4.

Avellaneda, L. (2008). Actividades enzimáticas de suelos con y sin historia de uso agrícola y manejo convencional y de sus consorcios bacterianos. Tesis para optar

al título de Magister en ciencias químicas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Departamento de química. Bogotá, D.C. 2008. P. 24, 25,27.

Avellaneda, L.; Muñoz, L.; Cuenca, C.; y Nieves, J. (2012). Actividades enzimáticas en consorcios bacterianos de suelos bajo cultivo de papa con manejo convencional y bajo pastizal. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 65(1), 6349-6360.

Ávila, E., Sadeghian, S., Sánchez M., y Castro, E. (2010). Respuesta del café al fósforo y abonos orgánicos en la etapa de almácigo1. *cenicafé*, 61(4), 358-369.

Barra, J.; Moreno, M.; y Calderón, M. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.

Barrios, M., Sandoval, E., Camacaro, O., y Borges, J. (2010). Importancia del fósforo en el complejo suelo-animal. *Mundo Pecuario*, 6 (2), 151-156.

Blanco, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239.

Blaya, S. y García, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi Prensa Libros.

Bonanomi, G.; D'Ascoli, R.; Antignani, V.; Capodilupo, M.; Cozzolino, L.; Marzaioli, R.; y Zoina, A. (2011). Assessing soil quality under intensive cultivation and tree orchards in Southern Italy. *Applied Soil Ecology*.

Calambas, R. (2009). *Estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo, en sistemas de producción de café orgánico y tradicional en los municipios de Caldone, Morales y Piendamó en el departamento del Cauca* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira).

Castillo, E., Quarín, H., Iglesias, C. (2000). Vermicompost chemical and physical characterization from raw and mixed organic wastes. *Agricultura técnica* 60: 74-79.

Carter, M. (2002). Soil quality for sustainable land management. *Agronomy Journal*, 94(1), 38-47.

Cerón L. y Melgarejo I. (2005). Enzimas del suelo: Indicadores de salud y calidad. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá., *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 10 No.1, 2005

Cerón, L. y Ramírez, E. (2011). Actividad microbiana en suelos y sedimentos en el sistema Córdoba Juan Amarillo, Bogotá DC. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(136), 349-361.

Ch, C.; Burbano, H. y Bonilla, C. (2007). Actividad de fosfatasa acida en suelos cultivados con papa y praderas del corregimiento de Catambuco, Pasto Colombia acid fostatase activity in soils cropping with potato and pastures from the Catambuco, Pasto, Colombia. *ACTA AGRON (COLOMBIA)*, 56(1), 13-16

Cobo, Y.; Angarica, E.; Martín, G.; Villazón, J.; Serrano, A. y Guaro, H. (2013). Título: Disponibilidad de Cobre, Zinc y Manganeso en suelos de importancia agrícola. Title: Copper, zinc and manganese content in soils of agricultural importance. *Revista Granma Ciencia*. Vol, 17(2).

Conti, M. (2002). Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. *Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina, disponible en: www. Ppi. Org, acceso en, 17(07)*.

Contreras, F.; Paolini, J. y Rivero, C. (2011). Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la actividad de la ureasa en suelos del municipio Rivas Dávila (estado Mérida). *Venesuelos*, 10(1-2), 12-17.

Córdoba, C. y León, T. (2013). Resiliencia de sistemas agrícolas ecológicos y convencionales frente a la variabilidad climática en Anolaima (Cundinamarca-Colombia).

Christensen,. (1996). Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil rganic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Global Environmental Change. Springer Berlin, pp. 143–160.

Cruz, A.; Barra, J.; del Castillo, R. y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, 13(2).

Das, S. y Varma, A. (2011). Papel de las enzimas en el mantenimiento de la salud del suelo en enzimología suelo (pp. 25-42) .Springerberlin Heidelberg.

Elizalde, G. (2009). El suelo en la fase superficial del ciclo geológico. *Geoenseñanza*, 14(2), 265-292.

Ernani, P.; Ribeiro, M. y Bayer, C. (2001). Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. *Sci. Agric*, 58, 825-831.

Escamilla, P.; Ruiz, R.; Díaz, P.; Landeros, S.; Platas, R.; Zamarripa, C. y González, H. (2005). El agroecosistema café orgánico en México. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica) No*, 5-16.

Federación Nacional de Cafeteros. Estadísticas históricas {en línea}. Disponible en: (www.federaciondecafeteros.org) Hora: 13:00

Ferreras, L.; Toresani, S.; Bonel, B.; Fernandez, E.; Bacigaluppo, S.; Faggioli, V.; Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *CI. SUELO (Argentina)*. Vol 27 N.1 p. (103-114).

Floch, C.; Capowiez, Y. y Criquet, S. (2009). Enzyme activities in apple orchard agroecosystems: How are they affected by management strategy and soil properties. *Soilbiology and Biochemistry*, 41(1), 61-68.

Gallardo, A.; Covelo, F.; Morillas, L. y Delgado, M. (2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Revista Ecosistemas*, 18(2).

Garbisu, C.; Becerril, J.; Epelde, L.; Alkorta, L. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*. Vol. 16. No 2 p. (44-49)

García, F. y Picone, L. (2004). Fósforo: Dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones agronómicas*, 55, 1-5.

García, R.; Ochoa, V.; Hinojosa, M.; Carreira, J. (2008). Suitability of enzyme activities.

García, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix, J., Cerdá, A., Campoy, M., Caravaca, F. (2010). Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem *Soil and Tillage Research*, 109(2), 110-115.

Gasca, A; Menjivar, C y Torrente, A. (2011). Cambios en el porcentaje de sodio intercambiable (psi) y la relación de absorción de sodio (ras) de un suelo y su

influencia en la actividad y biomasa microbiana. *Acta agron.* vol.60, n.1, pp. 27-38. issn 0120-2812.

Gliessman, Stephen R. (2002) Agroecología: procesos agroecológicos en agricultura sostenible. Ed. Eric Engels. Turrialba. Costa rica. P. 3

Glover, J.; Reganold, J. y Andrews, P. (2000). Método sistemático para la calidad de calificación del suelo de huertos de manzanas convencionales, orgánicos, e integrados en el estado de Washington. *Agriculture, ecosystems and environment*, 80(1), 29-45.

Haanstra, L. y Doelman, P. (1991). An ecological dose response model approach to short and long term effects of heavy metals on arylsulphatase activity in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 11(1), 18-23.

Havlin, L.; Beaton, D.; Tisdale, L.; Nelson, L. (1999). Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. upper saddle river (estados unidos), prentice hall. 499 p.

Henríquez, C.; Uribe, L.; Valenciano, A. y Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo Deshidrogenasa, β -Glucosidasa, Fosfatasa y Ureasa bajo diferentes cultivos. *Agronomía Costarricense*

ICA (1992). Fertilización en diversos cultivos. Manual de asistencia técnica No 25. Quinta aproximación. Centro de investigación Tibaitá. Pág. 20 y 21.

IGAC (2007). Consideraciones generales para interpretar análisis de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología. Bogotá. Colombia

Kamiyama, A.; de Maria, I.; de Souza, D. y da Silveira, A. (2011). Percepção ambiental dos produtores e qualidade do solo em propriedades orgânicas e convencionais. *Bragantia*, 70(1), 176-184.

Karlen, D.; Mausbach, M.; Doran, J.; Cline, R.; Harris, R. y Schuman, G. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10

Keller, T., & Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154(3), 398-406.

Lal, R.; WH Blum; C Valentine y BA Stewart. (1998). Methods for assessment of soil degradation. In: *Advances in Soil Science*, Lewis Publishers, Boca Raton, p. 558.

León, T. (2009). Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. SOCLA (*Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología*). Medellín, Colombia. Pp, 49.

López, F. (1997). Efectos climáticos sobre la productividad. *Aportes*, 13, 91-102

Ma, X.; Chen, L.; Chen, Z.; Wu, Z.; Zhang, L. y Zhang, Y. (2010). Soil glycosidase activities and water soluble organic carbon under different land use types. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 10(2), 93-101.

Macera, O. y Astier, M. (1999). Sustentabilidad y manejo de recursos naturales en el marco de MESMIS. Mundiprensa México.

Makoi, J. y Ndakidemi, P. (2008). Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 7(3).

Manna, C., y Singh, V. (2001). Long-term effects of intercropping and bio-litter recycling on soil biological activity and fertility status of sub-tropical soils. *Bioresource technology*, 76(2), 143-150.

Marcela, T.; Dalurzo, H. y Vázquez, S. (2010). Fosfatasa ácida en Oxisoles bajo cultivo de tabaco. *Ciencia del suelo*, 28(1), 33-38.

Martha C Henao (2007). Universidad Nacional de Colombia. Métodos de análisis del suelo versión 04 . Facultad de Agronomía.

Martens, A. Johanson; T. Freankenberger. (1992). Production and persistence of soil enzymes with repeated additions of organic residues. *Soil Sci.* 153:53- 61.

Martínez, E.; Fuentes, J. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.r

Matus, F.; Osorio, A. y Acevedo, A. (2002). Efecto del manejo y algunas propiedades del suelo sobre la densidad aparente. *RC suelonutr. Veg*, 2(1), 7-15.

Melero, S.; López, R.; López, L.; Muñoz, V.; Moreno, F. y Murillo, J. (2011). Long term effect of tillage, rotation and nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol. *Soil and tillage research*,114(2), 97-107.

Mendoza, M; Oltrarosello, J.; Vidal, C.; Tomas, T. (2011). La calidad de las prácticas agrícolas en el proceso de transformación a la agricultura ecológica en Enguera y Anna (comunidad valenciana). Departamento de Planificación Territorial. Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE CSIC, Universidad de Valencia. España.

Mendoza, T. (2011) *Sistemas agroecológicos y relaciones sociales en fincas de la cuenca del rio Chicú*. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.

Millán, G.; Vázquez, M.; Terminiello, A. y Sbuscio, D. (2010). Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ciencia del suelo*, 28(2), 131-140.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Desarrollo de la Fruticultura en Cundinamarca. En: Plan Frutícola Nacional. (Bogotá, octubre de 2006). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural MADR .Gobernación de Cundinamarca .Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola – FNFH. Asociación Hortifrutícola de Colombia – Asohofrucol. Sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca – SAG.

Moguel, P. y Toledo, V. (1999). Biodiversity conservation in traditional Coffe system of Mexico. *Conservation Biology*, 13, (1), 11-21.

Muschler, R. (1999). *Árboles en cafetales* (No. 5). Catie.

Mokolobate, M., y Haynes, R. (2002). Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. *Biology and Fertility of Soils*, 35(2), 79-85.

Nangarí, A. (2012). Variación de la actividad enzimática del suelo en formaciones vegetacionales esclerófilas de la zona central de Chile.

Narvaez, M. (2008). *Evaluación de actividad de fosfatasas y deshidrogenasas por efecto de la aplicación de vinazas en suelos cultivados con maíz dulce Zea mays L* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Navarro S.; Navarro G. (2003). Química agrícola. el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi–Prensa, Madrid. 487 p.

Norgaard B., y Sikor, O. (1999). Metodología y práctica de la agroecología. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Altieri, MA. Narciso-Comunidad Montevideo

Ochoa, M.; Rivera, R.; Bustamante, C. y Rodríguez, M. (2000). La fertilización fosfórica del Coffea arabica L. En suelo Ferrítico Rojo oscuro. Parte I. Fertilización mineral. *Cultivos Tropicales*, 21(1), 73-79.

Ochoa, V.; Hinojosa, B.; Gómez, B. y García, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la Investigación*, (2).

Olaso, F. (2012). Efectos del clima, el suelo y el manejo sobre la productividad de cultivos en un agroecosistema experimental.

Pajares, S.; Gallardo, J.; Marinari, S. y Etchevers, J. (2010). Indicadores bioquímicos de calidad en tepetates cultivados del eje neovolcánico mexicano. *Agrociencia*, 44(2), 121-134. Recuperado en 06 de febrero de 2015, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000200001&lng=es&tlng=pt. 12:26 pm.

Panettieri, M.; Lazaro I.; López, R.; Murillo, J.; Madejón E. (2013). Glyphosate effect on soil biochemical properties under conservation tillage *Soil and Tillage Research* 133 (2013) 16–24.

PAOLINI, J. 2003. Actividades enzimáticas en suelos de los altos llanos centrales (estado Guárico). *Venesuelos* 11(1-2):39-46.

Parr, J.; Papendick, R.; Hornick, S.; Meyer, R. (1992). Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Alternative Agriculture* 7: 5-11.

Pérez, A., Céspedes, C., y Núñez, P. (2008). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en República Dominicana. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(3), 10-29.

Perfecto, I.; Mas, A.; Dietsch, T. y Vandermeer, J. (2003). Conservation of biodiversity in coffee agroecosystems: a tri-taxa comparison in southern Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 12(6), 1239-1252.

Picone, L. y Zamuner, E. (2002). Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. In *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn*.

Porras, C. (2006). Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica.

Prager, M.; Mósquera, M.; Naranjo, R. y Sanclemente, Ó. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*, 7(1), 19-34.

Quenum, L. (2010). Comparación entre la producción ecológica e integrada de hortalizas en base a parámetros del cultivo y del suelo.

Quinchoa, R., Villegas, J., Santamaría, G., Torres, C. (2010). Determinación del efecto de diferentes niveles de fertilización en papa (*Solanum tuberosum ssp. andigena*) Diacol Capiro en un suelo con propiedades ándicas de Santa Rosa de Osos, Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 63(1), 5225-5237

Resilience Alliance (2013), Resilience Alliance Home page. The Resilience Alliance. En internet: <http://www.resalliance.org/>. Hora: 10: 00 Consultado el 6 de octubre de 2013.

Reyes, F.; Lillo, A.; Ojeda, N.; Reyes, M. y Alvear, M. (2011). Efecto de la exposición y la toposecuencia sobre actividades biológicas del suelo en bosque relicto del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 255-265.

Rivera, R. y Martin, J. (1979). Efecto de niveles de N, P y K en C. Arabicavar. Mundo Novo cultivado al sol, sobre fondo fijo de arropo y compost en la fase fomento, 1: Propiedades químicas y físico-químicas del suelo. Ciencia y Técnica en la Agricultura. *Café y Cacao (Cuba)*, 1(1-2), 55-66.

Rodríguez, M., (2009). Evaluación del papel de los microorganismos lignocelulolíticos sobre los residuos vegetales en suelos rizosféricos de papa criolla *solanum phureja* en municipios de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Maestría en ciencias- microbiología. Bogotá D.C.

Roldán, A.; Caravaca, F.; Hernández, M.; García, C.; Sánchez, C.; Velásquez, M. y Tiscareño, M. (2003). No tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico).

Roldán A, Salinas, R, Alguacil, M, et al (2005) Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl Soil Ecol* 30:11–20

Rosset, P. (1997). La crisis de la agricultura convencional, la sustitución de insumos y el enfoque agroecológico. *Revista de CLADES* No 11/12.

Salamanca, A. y Sadeghian, S. (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Avances Técnicos* 326 Cenicafé.

Salamanca, C. (2008). *Efecto de las fuentes orgánicas obtenidas de los subproductos agroindustriales de la caña de azúcar (saccharumofficinarum l) y el plátano (musa spp.) Sobre la actividad microbiana y enzimático en el suelo* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Sadeghian, S., García, C., y Montoya, C. (2005). Respuesta del cultivo de café a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *cenicafé*, 57(1), 58-69.

Sadeghian, S. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé (Colombia)*.(Jul-Set, 54(3), 242-257.

Samayoa, J. y Sánchez, V. (2001). Comparación de la incidencia de enfermedades del fruto en sistemas de producción de café orgánico y convencional. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*. (Jun 2001). (60), 36-42.

Sanchez, J.; Harwood, R.; Willson, T.; Kizilkaya, K.; Smeenk, J.; Parker, E. y Robertson, G. (2004). La gestión del carbono del suelo y nitrógeno para la productividad y la calidad del medio ambiente. *Agronomyjournal*, 96(3), 769-775.

Sánchez De, M., Prager, M., Naranjo, R. E., y Sanclemente, O. E. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*, 7(1), 19-34.

Sardans, J. y Peñuelas, J. (2005) Drought decreases soil enzyme activity in Mediterranean *quercusilex*. *Forest. Soil biolbiochem* 37:455–461

Secretaría de planeación (2006). Banco Medios. Escala Grafica 1:1.000.000. <http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co> Hora: 23:14.

Segrelles, J. (2001). Problemas ambientales, agricultura y globalización en América Latina.

Sendino, P. (2014). Diseño BACI: Efectos ambientales de una piscifactoría de Jaulas Flotantes en el Mediterráneo y su recuperación tras el cese de la actividad. (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Valencia).

Shukla, G. y Varma, A. (2011). *Soil enzymology* (Vol. 22). Springer.

Silveira, N. (2005). Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en la microcuenca del Río Sesesmiles, copán, Honduras. Tesis para optar al título de Magister Scientiae en Agroforestería Tropical. Centro Agronómico Tropical de investigación. Turrialba, Costa Rica.

Snyder, C. y Slaton, N. (2003). Efectos de la Inundación y secado del suelo en las reacciones del fósforo. *Informaciones Agronómicas (Ecuador)*.

Smil, V. 1997. Global population and the nitrogen cycle. *Scientific American* 277:76-81. En: Zapata, n., (2010). Determinación de parámetros biológicos y físico-químicos asociados. Tesis para optar al título de magister en ciencias – microbiología. Universidad Nacional de Colombia.

Silva, R. Reinert, J., Reichert, M.(2000). Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. revista brasileira de ciência do solo, v.24, p.191-199, 2000a.

Taboada, M.; Alvarez, C. (2008). Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

Taboada, M.; Micucci, F. y Alvarez, C. (2008). Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. P. 94-153. En: Taboada, M.A. y Alvarez, C.R: (ed). Fertilidad Física de los Suelos. 2ª. Edición. EFA. Buenos Aires

Thompson, L. y Troeh, F. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. Reverté

Tilman, D. (1998). The greening of the green revolution. *Nature*, 396(6708), 211-212.

Tilman, D.; Cassman, K.; Matson, P.; Naylor, R. y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.

Torres, J. (2011). Evaluación de técnicas de cultivo y variedades, mediante parámetros agronómicos y edáficos, para la optimización de una rotación en secano semiárido en régimen ecológico, basada en cereales y leguminosas grano.

Torres, M. y Lizarazo, L. (2006). Evaluación de grupos funcionales (ciclo del C, N, P) y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá (Colombia). *Agron. Colomb*, 24(2), 317-325.

Valera, M., (2010). Evaluación de sistemas de producción agroecológicos incorporando indicadores de sostenibilidad en la sabana de Bogotá. Trabajo de grado para optar al título de magister en ambiente y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias económicas

Vásquez, M. y Valle, R. (1991). Evaluación de fuentes nitrogenadas de fertilizantes y su efecto en la acidez del suelo. In *Simposio sobre Caficultura Latinoamericana, Panamá* (pp. 475-486)

Wang, C., Han, G., Jia, Y., Feng, X., Guo, P., y Tian, X. (2011). Response of litter decomposition and related soil enzyme activities to different forms of nitrogen fertilization in a subtropical forest. *Ecological research*, 26(3), 505-513.

Wang, X. y Lu, Q. (2006). Beta-glucosidase activity in paddy soils of the Taihu Lake region, China. *Pedosphere*, 16(1), 118-124.

Yoshioka, I.; de Prager, M. y Bolaños, M. (2006). Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo. *Dieciocho*, 3(10), 20.

Zamora, F.; Mogollón, J. y Rodríguez, N. (2005). Cambios en la biomasa microbiana y la actividad enzimática inducidos por la rotación de cultivos en un suelo bajo producción de hortalizas en el estado Falcón, Venezuela. *Multiciencias*, 5(1), 62-70.

Zapata, N. y Bogotá, S. (2010). Determinación de parámetros biológicos y físico-químicos asociados.

Zetina, R.; Trinidad, A.; Oropeza, J.; Volke, V. y Landois, L. (2005). Relación bases intercambiables rendimiento de maíz en un Cambisol distrito con labranza, encalado y abono verde. *Terra: organocientífico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, AC*.

Zuluaga, J.; Zambrano, D.; Rodríguez, N.; Dávila, M. (1993). Estrategias para el manejo y valorización de los subproductos del proceso de beneficio húmedo del café. In: SEMINARIO sobre Control de la Contaminación en la Agroindustria Cafetera. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, p. 82

Anexo No 1. MATRICES DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS POR ÈPOCA Y POR MANEJO

MATRIZ FACTORIAL

PC	Eigenvalues		
	Eigenvalues	%Variation	Cum.%Variation
1	2,92	58,4	58,4
2	1,04	20,9	79,3
3	0,531	10,6	89,9
4	0,325	6,5	96,4
5	0,179	3,6	100

MATRIZ DE CORRELACIONES DE VARIABLES

Eigenvectors					
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
β- GLUCOSIDASA	0,49	-0,349	0,22	0,527	0,559
FOSFATASA ACIDA	0,514	0,046	0,043	-0,797	0,311
FOSFATASA ALCALINA	0,436	0,228	-0,838	0,208	-0,107
UREASA	0,521	-0,22	0,319	0,044	-0,76
PROTEASA	0,184	0,881	0,382	0,207	0,043