



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.  
FACULTAD DE AGRONOMÍA.  
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO.  
POSTGRADO EN CIENCIA DEL SUELO**



**FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LAS VARIEDADES DE CAFÉ  
SOBRE LAS PROPIEDADES BIOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS COMO  
INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES**

**Yuri Janio Pardo Plaza**

**Maracay, 2017**

**TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OPTAR AL TITULO DE  
“DOCTOR EN CIENCIA DEL SUELO”**

**COMITÉ ASESOR**

---

Dra. Rosa Mary Hernández

---

Dr. Juan Carlos Aciego Pietri

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo con amor y gratitud a mi madre NEYLA ROSA PLAZA GALVÁN, quien ha sido un incentivo permanente para que siga adelante por los caminos del bien, la sensatez, honestidad y humildad.*

*A mis hijos JAIR ALEXIS, JANIO ALONSO, RAISA MILENI, MELISSA YICETH y SHEYLA YURIAN como una luz en el camino de la superación.*

*A MIRIAM ELENA por incentivar me a enfrentar este reto, por su apoyo permanente y AMOR incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA – MONTERÍA – COLOMBIA por su apoyo incondicional para el mejoramiento académico de sus docentes en pro de una mejor calidad de la educación que ofrece a sus estudiantes, en su mayoría de las clases populares de la región de influencia.

AI POSTGRADO EN CIENCIA DEL SUELO de la Facultad de Agronomía de la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, por la formación académica recibida.

Al Dr. JORGE EMILIO PAOLINI GÓMEZ por su acertada dirección y por su enorme calidad humana.

AI INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS – IVIC y en particular al personal del CENTRO DE ECOLOGÍA del IVIC por todo el apoyo ofrecido para el desarrollo de esta investigación.

A los doctores JUAN CARLOS ACIEGO Y ROSA MARY HERNÁNDEZ por su excelente asesoría y correcciones desde el comité asesor.

Al laboratorio de suelos de la Universidad de Córdoba, por los análisis realizados.

A los estudiantes de doctorado del IVIC ENRIQUE QUINTERO Y HUMBERTO APONTE por su asesoría y apoyo en los análisis de estadística. Excelentes amigos.

## RESUMEN.

La monitorización de los parámetros bioquímicos, como actividades enzimáticas y los relacionados con la biomasa microbiana y respiración basal pueden ser relevantes en el estudio de la calidad y funcionalidad de los suelos naturales y los suelos relacionados con sistemas agrícolas tradicionales y/o los sistemas de manejo ecológicos y sostenibles. En el presente trabajo se desarrollaron índices de calidad del suelo (ICS) a partir del estudio de la fluctuación temporal y el efecto de las variedades de café sobre algunas propiedades bioquímicas (actividades enzimáticas), microbiológicas (respiración basal, biomasa microbiana y constantes ecofisiológicas), y fisicoquímicas como indicadores de calidad del suelo, bajo sistemas agroforestales.

La Respiración Basal y las Constantes Ecofisiológicas del suelo mostraron sensibilidad a los cambios por época de muestreo y por variedad, y en los suelos con la variedad de café Caturra fue metabólicamente más eficiente en el uso de los sustratos energéticos durante la época lluviosa. Por otra parte las actividades enzimáticas amonificación de arginina (AA), e hidrólisis del diacetato de fluorisceína (DAF) fueron sensibles a los cambios por época de muestreo y por variedad; la deshidrogenasa (DH), y proteasa (Caseinasa), resultaron sensibles a las fluctuaciones temporales, mientras que la  $\beta$ -glucosidasa ( $\beta$ -glu) y ureasa fueron las menos sensibles debido a que no mostraron diferencias significativas por estacionalidad ni por variedades en los suelos estudiados.

Los ICS muestran una tendencia similar, tanto para los desarrollados con las variables elegidas a partir del Análisis de Componentes Principales (ACP) como para los desarrollados a partir de las variables que más aportan a la discriminación en el Análisis Canónico de Componentes Principales (ACCP). Estos ICS, resultaron eficaces en discriminar las variedades y épocas climáticas de muestreo en los sistemas estudiados.

## **ABSTRACT.**

The monitoring of biochemical parameters as enzyme activities and those related to microbial biomass and basal respiration can be relevant in the study of the quality and functionality of natural soils and those related to traditional farming systems and/or ecological and sustainable management systems. In this paper there were developed indices of soil quality (ISQ) from the study of the temporal fluctuations and the effect of coffee varieties on some biochemical properties (enzyme activities), microbiological (basal respiration, microbial biomass and the ecophysiological indexes) and physicochemical as indicators of soil quality under agroforestry systems.

Soil microbiota showed sensitivity to the changes by time sampling and variety, and in soils with the Caturra variety coffee was metabolically more efficient in the use of energy substrates during the rainy season. On the other hand, AA, DA enzymatic activities were sensitive to changes by time sampling and variety; DH and protease, were susceptible to temporary fluctuation, while the  $\beta$ -glucosidase and urease were the least sensitive since they showed no significant differences for seasonality or varieties in the soils studied.

The ISQ show a similar trend for both developed with the chosen variables from the ACP as well as developed from the variables that contribute to discrimination in the ACCP. These ISQ, were effective in discriminating varieties and climatic times of sampling in the systems studied.

## TABLA DE CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN .....	18
CAPÍTULO I.....	20
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2. HIPÓTESIS .....	20
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
1.3.1. Objetivo General.....	21
1.3.2. Objetivos específicos .....	21
1.4. MARCO CONCEPTUAL.....	22
1.4.1. El cultivo de café bajo sombra .....	23
1.4.2. Tipología de cafetales según su diversidad y estructura .....	27
1.4.3. Agricultura de conservación.....	32
1.4.4. Ecología y condiciones de crecimiento.....	33
1.4.5. Café en Venezuela.....	35
1.4.6. Origen y distribución.....	36
1.4.7. Variedades y clasificación.....	37
1.4.8. Parámetros bioquímicos .....	41
1.4.9. Biomasa Microbiana del Suelo.....	42
1.4.10. Indicadores de calidad y salud del suelo .....	43
1.4.11. Índices de Calidad del Suelo .....	45
CAPITULO II .....	49
FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS COMO INDICADORES DE CALIDAD, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ.....	49

2.1. INTRODUCCION.....	49
2.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGROECOLÓGICOS CON CAFÉ. ....	51
2.3. MATERIALES Y METODOS .....	52
2.3.1. Descripción del sitio.....	52
2.3.2. Diseño experimental.....	54
2.3.3. Muestreo de suelos .....	55
2.3.4. Análisis de Laboratorio .....	56
2.3.5. Análisis Estadístico .....	56
2.3.6. Propiedades Fisicoquímicas .....	58
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
2.4.1. Porcentaje de humedad del suelo (%Hum) .....	59
2.4.2. Densidad Aparente (DA).....	60
2.4.3. Porcentaje de arena (%arena) .....	62
2.4.4. Porcentaje de limo (% limo).....	63
2.4.5. Porcentaje de arcillas (% arcillas) .....	65
2.4.6. Clase textural.....	65
2.4.7. pH .....	67
2.4.8. Conductividad eléctrica (CE) .....	69
2.4.9. Carbono orgánico total (COT) .....	71
2.4.10. Nitrógeno total (NT).....	73
2.4.11. Fosforo total (PT) .....	76
2.4.12. Fosforo asimilable (Pasim).....	77
2.4.13. Capacidad de intercambio catiónico real (CICR).....	79
2.4.14. Cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na) .....	81

2.4.14.1. Calcio (Ca) .....	81
2.4.14.2. Magnesio (Mg).....	81
2.4.14.3. Potasio (K).....	83
2.4.14.4. Sodio (Na) .....	85
2.4.15. Aluminio e Hidrógeno intercambiables (Al+H).....	87
2.5. CONCLUSIONES.....	89
CAPITULO III .....	90
FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS: RESPIRACIÓN BASAL Y BIOMASA MICROBIANA, COMO INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ. ....	90
3.1. INTRODUCCIÓN.....	90
3.2. GENERALIDADES SOBRE BIOMASA MICROBIANA DEL SUELO Y SU ACTIVIDAD .....	91
3.3. CONSTANTES ECOFISIOLÓGICAS.....	93
3.3.1. Cociente metabólico .....	93
3.3.2. Cociente microbiano ( $q_{Mic}$ ) .....	95
3.3.3. Cociente de eficiencia metabólica.....	95
3.4. PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGROECOLÓGICOS.....	96
3.5. MATERIALES Y METODOS .....	100
3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
3.6.1. Respiración basal ( $R_{bas}$ ) ( $mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ d^{-1}$ ).....	101
3.6.2. C de la Biomasa Microbiana (CBM o $C_{mic}$ ) ( $mgC_{mic}kg^{-1}$ ) .....	105
3.6.3. Cociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) [ $mg\ C-CO_2/g\ C_{mic}*h$ ].....	111
3.6.4 Cociente Microbiano ( $q_{Mic}\ %$ ): $(C_{mic}/C_{org})*100$ .....	116
3.6.5. Cociente de Eficiencia Metabólica ( $q_{CO_2}C_{org}^{-1}$ ):.....	119

$[(\text{mgC-CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{C}_{\text{mich}} \text{h}^{-1}) / (\text{gC}_{\text{org}} \cdot \text{g}^{-1} \text{ss})]$ .....	119
3.7. CONCLUSIONES.....	122
CAPITULO IV .....	124
FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS COMO INDICADORAS DE CALIDAD DEL SUELO, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL.....	124
4.1. INTRODUCCIÓN.....	124
4.2. GENERALIDADES SOBRE ENZIMAS DEL SUELO .....	125
4.3. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS .....	130
4.4. MATERIALES Y METODOS .....	131
4.4.1. Propiedades Bioquímicas .....	132
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	132
4.5.1. Actividad deshidrogenasa (DH): ( $\mu\text{g INTF g}^{-1} \text{ss} \cdot \text{h}^{-1}$ ).....	132
4.5.2. Actividad amonificación de arginina (A.A): ( $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ).....	137
4.5.3. Actividad hidrólisis del diacetato de fluoresceína (DAF):.....	139
( $\mu\text{g Fluoresceína g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ).....	139
4.5.4. Actividad fosfomonoesterasa ácida (Pta): ( $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ) ....	142
4.5.5. Actividad $\beta$ -glucosidasa ( $\beta$ -glu): ( $\mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ).....	147
4.5.6. Actividad ureasica (ureasa): ( $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ) .....	150
4.5.7. Actividad proteásica – caseinasa: ( $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ss h}^{-1}$ ) .....	154
4.6. CONCLUSIONES.....	157
CAPITULO V .....	158
INDICES DE CALIDAD DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ BAJO SOMBRA.....	158
5.1. INTRODUCCIÓN.....	158

5.2. MATERIALES Y METODOS .....	159
5.2.1.1. PERMANOVA Y PERMDISP multivariado.....	160
5.2.1.2. Análisis Canónico de Coordenadas Principales (con las variables que mostraron diferencias significativas según PERMANOVA) .....	160
5.2.1.3. Análisis de Componentes Principales (ACP).....	161
5.2.2. Selección de Indicadores .....	161
5.2.3. Índices de Calidad del Suelo .....	162
5.2.3.1. Aplicación del análisis de componentes principales (ACP).....	166
5.2.3.2. Aplicación del análisis canónico de coordenadas principales (ACCP o CAP) .....	168
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	169
5.3.1. PERMANOVA Y PERMDISP multivariado.....	169
5.3.2. Análisis de Componentes Principales (ACP) E Índices de Calidad del Suelo .....	169
5.3.3. Análisis Canónico de Coordenadas Principales (ACCP o CAP) (con todas las variables que mostraron diferencias significativas según PERMANOVA) .....	174
5.3.4. Índices usando la media geométrica (MG).....	177
5.3.5. Comparación de los Índices de Calidad de Suelos.....	178
5.4. CONCLUSIONES.....	185
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	188
ANEXOS .....	201

## LISTA DE TABLAS.

	<b>Página</b>
<b>Tabla 2.1</b> Propiedades químicas como indicadores de calidad y suministro de nutrientes en suelos agrícolas, de pastos y de bosques, (Adaptado de Schoenholtz et al., 2000).....	50
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades físicas como indicadores de calidad del suelos, usados o recomendados por investigadores del suelo (Adaptado de Schoenholtz et al., 2000).....	51
<b>Tabla 2.3</b> Parámetros Fisicoquímicos.....	58
<b>Tabla 2.4</b> Media $\pm$ error estándar para las propiedades físicas del suelo y nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (Pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías. ....	62
<b>Tabla 2.5</b> Media $\pm$ error estándar para las propiedades químicas de los suelos y nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías. ....	69
<b>Tabla 3.1</b> Contenido de C microbiano (Cmic) de suelos de diferentes ecosistemas. ....	98
<b>Tabla. 3.2</b> Media $\pm$ error estándar para las propiedades microbiológicas y las constantes ecofisiológicas. ....	101
<b>Tabla 4.1</b> Enzimas del suelo, clasificación y su función ecológica (Skujins, 1967; Dick, 1997).....	128
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros bioquímicos generales. ....	132
<b>Tabla 4.3</b> Parámetros bioquímicos específicos.....	132
<b>Tabla 4.4</b> Media $\pm$ error estándar para los parámetros bioquímicos generales (DH, A.A y DAF).....	136
<b>Tabla 4.5</b> Media $\pm$ error estándar para los parámetros bioquímicos específicos (Ptsa, $\beta$ -glu, ureasa y caseinasa).....	146
<b>Tabla 5.1</b> PERMANOVA y PERMDISP multivariado sobre los datos normalizados y distancias euclidianas, para todas las variables evaluadas.....	170
<b>Tabla 5.2</b> Test KMO y Bartlett.....	170
<b>Tabla 5.3</b> Autovalores y Varianza explicada por componentes principales con autovalores $>1$ .....	171
<b>Tabla 5.4</b> Matriz de componentes y comunalidades.....	172

<b>Tabla 5.5</b> Coeficientes de correlación entre las variables con alta carga factorial en el primer componente principal. ....	173
<b>Tabla 5.6</b> Coeficientes de correlación entre las variables con alta carga factorial en el segundo componente principal. ....	173
<b>Tabla 5.7.</b> Análisis de correlación canónica .....	175
<b>Tabla 5.8.</b> Ejes de coordenadas principales ( <i>m</i> ). ....	175
<b>Tabla 5.9.</b> Validación cruzada dejando una asignación de las observaciones de los grupos fuera (para la elección de <i>m</i> : 9). ....	176
<b>Tabla 5.10</b> Permanova y PERMDISP univariados de los índices de calidad de suelo, a partir de los datos normalizados y 9999 permutaciones. ....	179

## LISTA DE FIGURAS.

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.1</b> Producción de café hipotéticamente idealizada sin sombra y bajo arboles con 50% de sombra en función de la elevación, para suelos A) sin limitaciones y B) con limitaciones de nutrientes, humedad o profundidad de enraizamiento (Beer et al., 1998; adaptado de Muschler, 1997).....	27
<b>Figura 1.2</b> Cinco sistemas de crecimiento de café en México, mostrando la complejidad de la vegetación. (Adaptado de Moguel y Toledo, 1999). .....	28
<b>Figura 1.3</b> Tipología de cafetales según su diversidad y estructura (Adaptado de Muschler et al., 2006). .....	29
<b>Figura 1.4</b> Morfología y distribución de raíces en una planta de <i>C. arábica</i> L. (Adaptado de Suárez de Castro, 1953; en Arcila, 2011). .....	34
<b>Figura 1.5</b> Mapa de distribución: origen del café. Tomado de Oestreich-Janzen (2013) ...	37
<b>Figura 1.6</b> Países productores de café en el mundo. (Adaptado Oestreich-Janzen, 2013)..	40
<b>Figura 1.7</b> Modelo conceptual para convertir el conjunto mínimo de datos a valores del índice (Adaptado de Andrews, 1998; Karlen et al., 2003). .....	47
<b>Figura 1.8</b> Curvas de respuesta de los indicadores. a) “Mas es mejor”, agregados estables; b) “Menos es mejor”, densidad aparente; y c) “Óptimo”, NO <sub>3</sub> -N (kg/ha). LT = umbral inferior, LB = línea base inferior, UT = línea base superior, O = óptimo (Glover <i>et al.</i> , 2000). .....	48
<b>Figura 2.1</b> Climadiagrama de la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel, estación 5191 en INAHMET).....	53
<b>Figura 2.2</b> Distribución de los sitios para el muestreo de suelos. ....	55
<b>Figura 2.3</b> Fluctuación estacional del % Hum para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	59
<b>Figura 2.4</b> Fluctuación estacional de la DA para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). ). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers).....	61
<b>Figura 2.5.</b> Fluctuación estacional del contenido de arena para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	63

<b>Figura 2.6.</b> Fluctuación estacional del contenido de limo para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Puntos fuera de las cajas o círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers) .....	64
<b>Figura 2.7.</b> Fluctuación estacional del contenido de arcillas para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	66
<b>Figura 2.8.</b> Clase textural para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	66
<b>Figura 2.9</b> Fluctuación estacional del pH para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	68
<b>Figura 2.10.</b> Fluctuación estacional de la Conductividad Eléctrica para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Puntos fuera de las cajas o círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers).....	70
<b>Figura 2.11.</b> Fluctuación estacional del Carbono Orgánico Total para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	73
<b>Figura 2.12.</b> Fluctuación estacional del Nitrógeno Total para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	75
<b>Figura 2.13.</b> Fluctuación estacional del PT para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	77
<b>Figura 2.14</b> Fluctuación estacional del Fósforo asimilable (Olsen) para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	78
<b>Figura 2.15</b> Fluctuación estacional de la CICR para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers).....	80
<b>Figura 2.16</b> Fluctuación estacional del Calcio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers).....	82
<b>Figura 2.17</b> Fluctuación estacional del Magnesio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	83
<b>Figura 2.18</b> Fluctuación estacional del potasio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	85

<b>Figura 2.19</b> Fluctuación estacional del sodio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	86
<b>Figura 2.20</b> Fluctuación estacional del Aluminio e Hidrógeno intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	87
<b>Figura 3.1</b> Ilustración de las tasas de variación entre la respiración basal, $C_{mic}$ y contenido de $C_{org}$ (Dilly et al. 2001). .....	96
Figura 3.2 Gráficos de cajas (boxplots) para el uso específico de la tierra (a) cociente microbiano ( $q_{Mic}$ ) y (b) cociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) en suelos del trópico. (Adaptado de Joergensen, 2010). .....	99
Figura 3.3 Fluctuación estacional de la Respiración basal para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	104
<b>Figura 3.4</b> Fluctuación estacional del Carbono microbiano para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	108
Figura 3.5 Fluctuación estacional del $q_{CO_2}$ para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	114
Figura 3.6 Fluctuación estacional del $q_{Mic}$ para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	118
<b>Figura 3.7</b> Fluctuación estacional del Coeficiente de eficiencia metabólico ( $q_{CO_2} C^{-1}_{org}$ ) para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	121
Figura 4.1 Localización y estados de las enzimas del suelo (Burns, 1982; Klose, 2003 y Ochoa et al., 2007).....	127
Figura 4.2 Fluctuación estacional de la actividad de la Deshidrogenasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	134
Figura 4.3 Fluctuación estacional de la Amonificación de la arginina para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	138
<b>Figura 4.4.</b> Fluctuación estacional de la Hidrólisis del diacetato de fluoresceína para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). .....	140

Figura 4.5 Fluctuación estacional de la actividad de la Fosfatasa ácida para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). ....	143
Figura 4.6 Fluctuación estacional de la actividad de la $\beta$ -Glucosidasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). ....	147
Figura 4.7 Fluctuación estacional de la actividad ureasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	151
Figura 4.8 Fluctuación estacional de la actividad caseinasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).....	156
Figura 5.2 Índice aditivo lineal (ICS – LA-ACP) .....	179
Figura 5.3 Índice aditivo sigmoidal ACP (ICS – ACP-sigmoidal) .....	180
Figura 5.4 Índice aditivo lineal ponderado ACP (ICS – LP-ACP) .....	180
Figura 5.5 Índice aditivo sigmoidal ponderado ACP (ICS – ACP-Sig.pond).....	181
Figura 5.6 Índice lineal aditivo CAP (ICS – LA-CAP).....	182
Figura 5.7 Índice sigmoidal aditivo CAP (ICS – SA-CAP).....	182
Figura 5.8 Índice media geométrica ACP (ICS – MG-ACP).....	183
Figura 5.9 índice media geométrica CAP (ICS – MG-CAP) .....	184

## INTRODUCCIÓN

El café está ampliamente distribuido a través del trópico con más de 70 especies. Todas las especies cultivadas son originarias de África. Las más importantes económicamente hoy son *Coffea arábica* (Arábica, 64% de la producción mundial) y *Coffea canephora*, (var. *Robusta*, 35%). El café es uno de los productos agrícolas de exportación más importantes en el mercado mundial, abarcando una superficie aproximada de 10,3 millones de hectáreas en todo el mundo y representa el único ingreso económico para más de 25 millones de familias. El cultivo es producido y exportado por más de 60 países y se ubica como uno de los productos comerciales más importantes de los países en desarrollo (Pohlan y Janssens, 2010).

Después del petróleo, el café es el producto más valioso comercializado a nivel mundial, con ventas globales estimadas en US\$90 billones. Brasil es el mayor productor de café del mundo, seguido por Vietnam y Colombia. El café es el principal producto de exportación de algunos países como Uganda, Burundi, Rwanda y Etiopía. Cerca del 70% del cultivo, es cultivado en minifundios, menores de 10 ha (DaMatta et al., 2007). Generalmente el café se cultiva bajo sombra de árboles del bosque nativo, aunque en los últimos años se ha favorecido el monocultivo a plena exposición solar con efectos negativos sobre los ecosistemas promoviendo pérdida de biodiversidad, erosión, contaminación química, entre otros (Muschler et al., 2006). Los sistemas agroforestales son los principales ejemplos de agroecosistemas ecológicamente sostenibles, debido a su eficiente uso de los recursos naturales y a su habilidad para amortiguar el impacto de los estreses ecológicos y socioeconómicos (Tully y Lawrence, 2011). Las investigaciones sobre sistemas agroforestales de café han identificado muchos factores ambientales, estrategias de manejo y características de plantas que afectan el crecimiento, rendimiento e impacto ambiental de los sistemas (Oijen et al., 2010). El café es intolerante a las heladas pero también a temperaturas demasiado altas. El uso de árboles de sombra puede ofrecer protección contra ambos tipos de temperaturas extremas (Oijen et al., 2010). Además en estos agroecosistemas se forma un mantillo o capa de residuos vegetales que sirven para regular la dinámica del

agua, evitando la evaporación excesiva, reteniendo humedad en la superficie del suelo, protegiéndolo de la erosión (Paolini et al., 2014) y su lenta descomposición ayuda a mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Los microorganismos son fundamentales en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos del suelo e influyen sobre los ecosistemas y su fertilidad, interviniendo tanto en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos como en la formación de la estructura del suelo (García et al., 2003; Dick, 1994).

Entre los parámetros bioquímicos, las enzimas del suelo son un importante componente, que están asociadas estrechamente con las características físicas, químicas y biológicas del suelo. Las actividades humanas, prácticas agrícolas y contaminación ambiental influyen severamente en las actividades enzimáticas del suelo (Karaca et al., 2011).

Nannipieri et al. (1990), indicaron que las actividades enzimáticas son específicas de un sustrato y están relacionadas con reacciones específicas. Por ello es difícil inferir, mediante un solo valor de actividad enzimática, el conocimiento del estado general de nutrientes de un suelo o determinar la actividad microbiológica del mismo. Sin embargo, las mediciones simultáneas de varias enzimas si pueden resultar útiles como marcadores de bioactividad y pueden utilizarse como índices de fertilidad bioquímica de los suelos (Gil-Sotres et al., 1992). En el presente trabajo se evaluará la actividad de varias enzimas, las propiedades microbiológicas y algunas propiedades fisicoquímicas, que sirvan para generar un índice matemático de calidad de estos suelos, cultivados con dos (2) variedades de café bajo sombra: Catuaí y Caturra, durante las épocas seca y lluviosa en el período de un año, bajo condiciones de fertilización orgánica pasiva, en la estación experimental Jaime Henao Jaramillo “El Laurel” de la UCV.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema a resolver se refiere a generar índices matemáticos para describir la calidad y salud de estos suelos y el conocimiento de los factores más críticos para el adecuado manejo de los suelos en estudio, por medio del estudio de la variabilidad por época climática para los parámetros microbiológicos y bioquímicos de los suelos en estos agroecosistemas. La mayoría de los parámetros fisicoquímicos del suelo no responden de manera inmediata a los cambios de manejo como lo hacen los microbiológicos y bioquímicos, con lo cual el estudio de la calidad biológica y bioquímica de los mismos pueden servir como indicadores de su estado general y salud (García et al., 2003; Dick, 1994).

Por otra parte, las variedades de café Caturra y Catuai, son de los más cultivados en diferentes partes del mundo debido a su alta productividad, bajo tamaño, aroma y sabor suave, en consecuencia, sería importante establecer si la variedad establecida influye sobre las actividades microbiológicas y bioquímicas de los suelos, lo cual a su vez se reflejaría en su calidad.

### 1.2. HIPÓTESIS

Las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo pueden servir como indicadoras de su calidad y de los cambios ocasionados por el estrés ambiental, por diferencias en el contenido de humedad del suelo, y también a los ocasionados por diferencias en las variedades de café establecidas.

La humedad y la variedad del cultivo establecido en los agroecosistemas afectan las propiedades y procesos bioquímicos y biológicos del suelo, por lo cual, indicadores

bioquímicos y microbiológicos mostrarán los cambios en la calidad de suelo producidos por dos tipos de variedades de café durante dos estaciones climáticas contrastantes.

### **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar algunas propiedades bioquímicas, microbiológicas y fisicoquímicas, que sirvan como indicadores de la calidad de suelos cafetaleros con dos (2) variedades: Catuaí y Caturra, bajo sombra, a diferentes contenidos de humedad del suelo, durante las épocas seca y lluviosa en un período de un año, en la estación experimental Jaime Henao Jaramillo “El Laurel” de la Universidad Central de Venezuela.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Evaluar la variabilidad por época climática y efecto del tipo de variedad sobre la biomasa microbiana y respiración basal, en un sistema agroforestal de café, durante el período de un año.
2. Estudiar el efecto del tipo de variedad y la época climática sobre las propiedades bioquímicas: actividad deshidrogenasa; actividad microbiana total usando DAF (Diacetato de fluoresceína); amonificación de arginina; actividad  $\beta$ -glucosidasa; actividad fosfatasa ácida; actividad ureasica; y actividad caseinasa, en un sistema agroforestal de café, durante un año.
3. Analizar durante el mismo período, la variabilidad por época climática y efecto de las variedades, sobre las propiedades fisicoquímicas: pH; conductividad eléctrica (CE); densidad aparente (DA); capacidad de intercambio catiónico real (CICR); Ntotal; COT, MOS; Pasimilable; Ptotal; cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na); H y Al

intercambiables (Al+H), en los sistemas agroforestales con dos variedades de café: Caturra y Catuai.

#### **1.4. MARCO CONCEPTUAL**

La calidad de los suelos de bosques depende de sus propiedades físicas, químicas, biológicas y bioquímicas. Dentro de estas propiedades, las microbiológicas (biomasa microbiana y respiración basal) y las bioquímicas (actividad enzimática) son las más sensibles y por lo tanto pueden proveer información de los cambios ocasionados por el estrés ambiental. Si se tiene en cuenta que la actividad microbiológica es esencial para mantener la calidad de los suelos, la biomasa microbiana y su actividad son aspectos que deben ser considerados para determinar el estado de un sistema, o para entender cómo la actividad humana altera los ciclos biogeoquímicos al comparar zonas naturales y degradadas. Las enzimas del suelo, por su parte, actúan sobre sustratos orgánicos haciendo disponible los nutrientes para las plantas, relacionándose así con los ciclos de nitrógeno (ureasa, proteasa), fósforo (fosfatasa), carbono ( $\beta$ -glucosidasa, celulasa) y azufre (arilsulfatasa) (Bastida et al., 2008).

Las determinaciones de actividades enzimáticas han sido utilizadas con diferentes propósitos en los estudios realizados sobre el tema: como indicadores de la productividad, como medida indirecta de la biomasa microbiana, para comparar los efectos de la rizósfera, como índice potencial del suelo para descomponer distintos materiales orgánicos (por ejemplo composts, residuos orgánicos, lodos activados, entre otros), como indicadores de posible contaminación con metales pesados o plaguicidas, y su remediación (Burns, 1982; Dick, 1992; Dick y Tabatabai, 1993).

### 1.4.1. El cultivo de café bajo sombra

Café con sombra es uno de los agroecosistemas mejor documentados con respecto a sus contribuciones a la conservación de la biodiversidad. A menudo, el cafetal bajo sombra de diferentes especies arbóreas es presentado como el prototipo de un sistema agroforestal "amigable" con la biodiversidad por su potencialmente alta diversidad taxonómica y estructural. La razón que permite lograr esta alta diversidad en cafetales es que *C. arábica* no solamente soporta sino, muchas veces, requiere de un cierto nivel de sombra para reducir estrés ambiental. Este requerimiento permite, sobre todo en ambientes no óptimos para el café, agregar al sistema un gran número de otras especies de plantas antes de llegar a niveles perjudiciales para la producción de café. (Muschler et al., 2006).

El mayor beneficio fisiológico que el café y cacao reciben de los árboles de sombra, puede ser ubicado en dos categorías principales, ambas asociadas a la reducción del estrés de las plantas:

1.- Mejora de las condiciones climáticas del sitio de cultivo, a través de: (i) reducción de las temperaturas extremas del aire (calor a menor elevación y frío a más alta elevación), (ii) reducción de la velocidad del viento, (iii) amortiguamiento de la humedad y disponibilidad de humedad del suelo y (iv) mejoramiento o mantenimiento de la fertilidad del suelo, incluyendo reducción de la erosión.

2.- Reducción en la cantidad y calidad de luz transmitida y por lo tanto se evita exceso en el crecimiento vegetativo. La sombra reduce el desbalance nutricional (Beer et al., 1998; Arellano et al., 2006).

De un lado, la caficultura es muchas veces percibida como una de las formas de uso de la tierra de menor impacto ecológico. Esta percepción se basa sobre todo en sistemas tradicionales, en los cuales los cafetos habían sido plantados o por debajo del dosel de un bosque secundario que retenía una gran parte de la biodiversidad original, o en conjunto con una alta diversidad de especies arbóreas.

Manejar cafetales con una alta biodiversidad permite conservar agua, suelos, flora y fauna. Sin embargo, en aquellos casos donde los cafetales tradicionales fueron transformados, sobre todo a partir de los años 50, a monocultivos modernos de café con poca o sin sombra y con uso intensivo de insumos químicos, la caficultura podría ser vista como uno de los destructores más notorios de la biodiversidad (Muschler et al., 2006). Una de las razones para el mantenimiento de los árboles de sombra en cultivos perennes son los ingresos proporcionados por sus frutos y/o madera; estos productos pueden suplementar los ingresos de los agricultores en épocas de precios bajos (Beer et al., 1998).

Los árboles de sombra producen madera a bajos costos de manejo y son considerados como una cuenta de ahorros que puede ser cosechada en tiempos de bajos precios o fracaso del cultivo subyacente. Los ingresos por árboles frutales, madera o leña, y de otros cultivos perennes usados como sombra en cultivos de café y cacao son significativos y pueden mejorar el desempeño financiero comparado con el uso de leguminosas convencionales como árboles de sombra (Hernández y Platen, 1995; Trejos y Platen, 1995).

La concientización sobre los altos insumos consumidos por los sistemas de monocultivos asociados con los altos costos ambientales como disminución de la fauna y flora, contaminación del agua del suelo y erosión del suelo en terrenos de pendiente (Boyce et al., 1994), han promovido un renovado interés en el uso de los árboles de sombra en áreas donde previamente habían sido eliminados, permitiendo además valorar la contribución de los campos de cultivo de café o cacao bajo sombra al mantenimiento de la biodiversidad. El rendimiento potencial, la competencia por agua, y la incidencia de plagas/enfermedades dependen de las condiciones del sitio, y son temas fundamentales en la controversia sobre el uso de los árboles de sombra en las plantaciones de café y cacao (Beer et al., 1998).

El contenido de materia orgánica del suelo (MOS) puede aumentar con el tiempo, bajo sistemas agroforestales de café y/o cacao, así por ejemplo la conversión de un campo con caña de azúcar a plantaciones de cacao, luego de un período de 10 años; la MOS aumentó 21% bajo el sistema de sombra con poda de la leguminosa *Erythrina poeppigiana* y 9% bajo el sistema no leguminosa sin poda con *Cordia alliodora* (Beer et al., 1990).

Las poblaciones de árboles leguminosos de sombra pueden variar desde menos de 100 árboles/ha hasta más de 300 árboles/ha, en muchas plantaciones estos árboles se dejan crecer libremente mientras que en áreas de manejo más intenso se pueden realizar varias podas al año, en este caso, los residuos se pueden dejar alrededor de los árboles, pueden ser cortados y esparcidos por el suelo o pueden ser exportados para forraje o leña. Todas estas prácticas podrían afectar los niveles de fijación de  $N_2$  y la disponibilidad de N para la plantación (Beer et al., 1998). Investigaciones realizadas con la asociación café – árboles de sombra leguminosos y no leguminosos, se encontró que *E. poeppigiana* fijó  $60 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Fassbender, 1987).

La habilidad de los árboles de sombra para producir grandes cantidades de materiales orgánicos, como hojarasca y residuos de podas, puede ser más importante que la fijación de  $N_2$ , gracias al positivo efecto que ejercen sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente en plantaciones que son fertilizadas (Beer et al., 1998). El manejo de la sombra, especialmente de poda, tiene una influencia crítica sobre el ciclaje de los nutrientes y por lo tanto además de su uso en el manejo del microclima del cultivo, proporciona una herramienta para la manipulación del tiempo y cantidad de nutrientes que se transfieren del árbol al suelo (Beer et al., 1998). Los estudios sobre el potencial del mantillo que se forma alrededor de los árboles de sombra, para sustituir la fertilización inorgánica, tendrán creciente importancia debido al rápido aumento de la demanda por productos orgánicos, producidos bajo sistemas de agricultura sostenible (Beer et al., 1998).

Los árboles de sombra contribuyen al control de la erosión, debido al mantillo que se origina por la hojarasca natural o por los residuos de la poda y que se puede mantener durante la estación lluviosa, por lo cual una baja velocidad de descomposición de la hojarasca sería beneficiosa (Beer et al., 1998). Se ha calculado que entre  $14$  y  $52 \text{ Mg C ha}^{-1}$  son almacenados en la biomasa leñosa aérea de árboles de sombra en plantaciones de café y cacao. Comparado con cultivos anuales, estos sistemas agroforestales también almacenan adicionalmente de  $10$  –  $50 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en la MOS y la capa de hojarasca (Kurstén y Burshel, 1993). Sin embargo la contribución potencial más valiosa de los sistemas de sombra perenne, con respecto a los niveles de  $CO_2$  atmosférico, reside en la protección del bosque permanente,

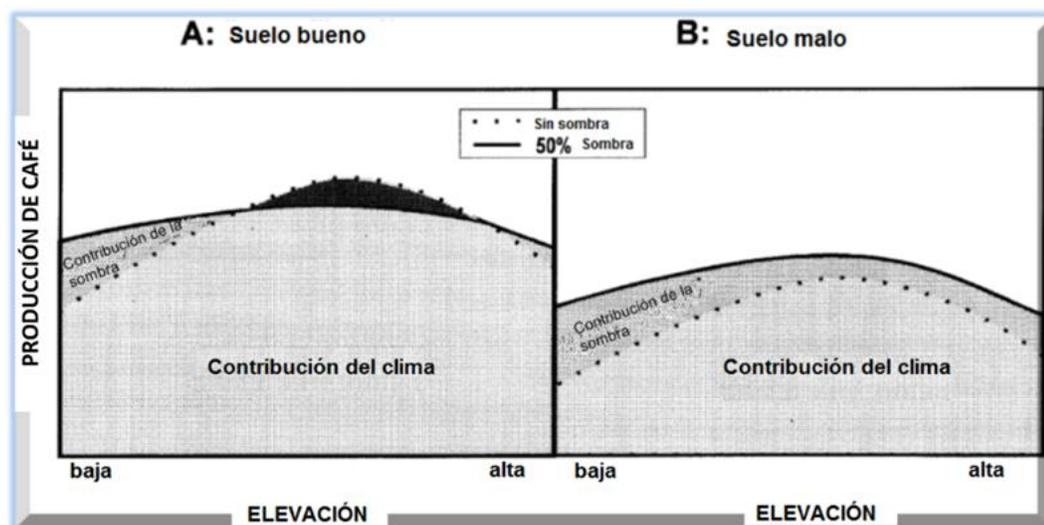
ofreciendo a los agricultores una frontera agrícola sostenible con cultivos comerciales alternativos a los sistemas agrícolas anuales de roza-tumba y quema, lo cual podría prevenir la liberación de aproximadamente 1000 Mg C ha<sup>-1</sup> (Beer et al., 1998).

Imbach et al. (1989a) encontraron pérdidas anuales por lixiviación a 60 o 100 cm de profundidad entre 5 a 9 kg N ha<sup>-1</sup> en el sistema café-sombra contra 24 kg N ha<sup>-1</sup> en plantaciones de café sin sombra. Estos valores fueron inferiores a los 50 – 100 kg N ha<sup>-1</sup> que se pierden por lixiviación en los agroecosistemas tropicales típicos (Imbach et al., 1989b). Cardoso et al. (2003) reportaron que en oxisoles bajo sistema agroforestal con café, las pérdidas de P orgánico disminuyen con la profundidad y son mayores en monocultivos con café tradicional, lo cual sugiere que los árboles de sombra influyen en la dinámica y tasa de ciclaje de P orgánico, favoreciendo la conversión de P orgánico a P inorgánico; como resultado, una gran fracción de P queda disponible para las plantas de café. La disponibilidad y transformaciones del P del suelo, no solo depende de las características del suelo, sino también de las interacciones con las plantas y de las asociaciones de plantas con microorganismos.

Las mayores producciones de café sin sombra se dan típicamente entre los 900 y 1200 msnm para suelos con o sin limitaciones de humedad o nutrientes. Los rendimientos para cada región dependen de las condiciones climáticas del sitio específico, incluyendo el efecto de la latitud sobre el promedio de temperaturas. A menores elevaciones la producción de café sin sombra disminuye fuertemente en respuesta a las altas temperaturas, mientras que a altas elevaciones disminuye en respuesta a las bajas temperaturas y posiblemente a daños por el viento. Bajo estas condiciones sub-óptimas, los árboles de sombra pueden amortiguar los microclimas extremos (aporte de la sombra). Sin embargo el sombreado en un rango de elevaciones óptimas puede reducir el rendimiento. En suelos con limitaciones de almacenamiento de agua o nutrientes a todas las altitudes, el potencial de rendimiento es mayor en los sistemas café-sombra (Fig. 1.1) (Beer et al., 1998).

Mientras la producción de café sin sombra para la elevación y condiciones de suelos dadas depende principalmente de las condiciones climáticas (contribución del clima), la

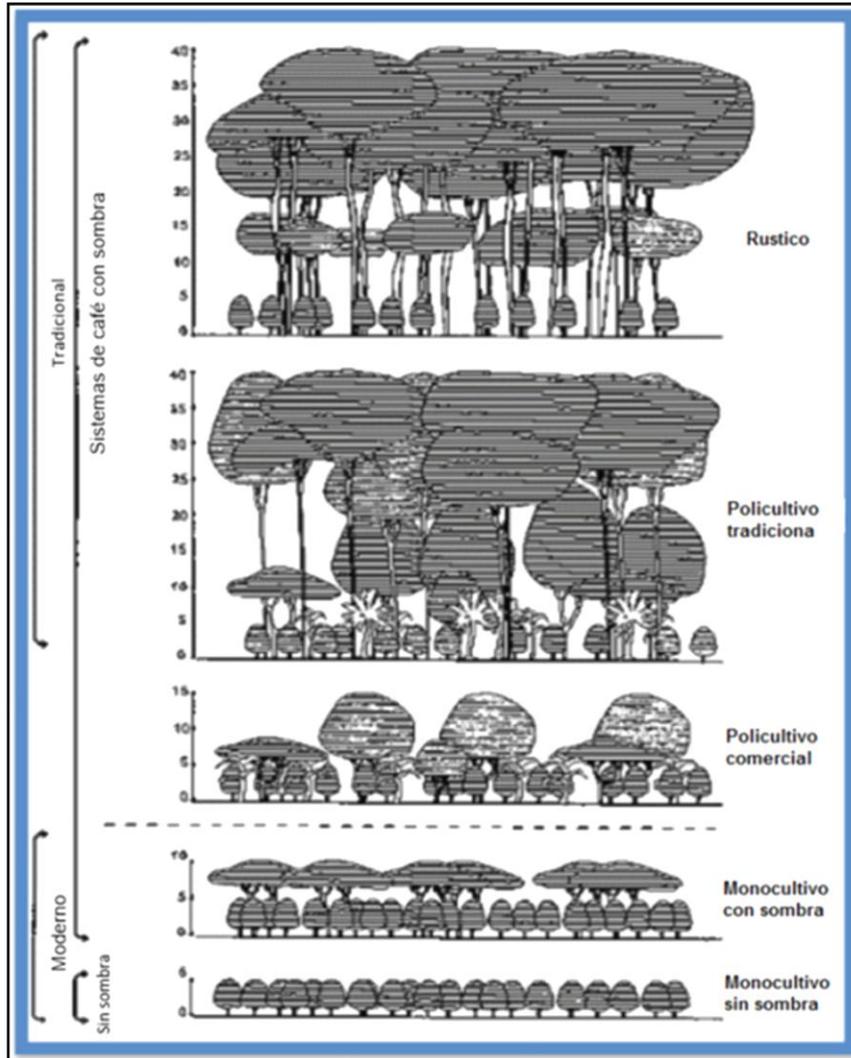
sombra puede mejorar la producción (contribución de la sombra) en condiciones marginales (Fig. 1.1). En condiciones de elevaciones ideales y suelos sin limitaciones, el sombreado puede limitar los rendimientos de café (Beer et al., 1998).



**Figura 1.1** Producción de café hipotéticamente idealizada sin sombra y bajo árboles con 50% de sombra en función de la elevación, para suelos A) sin limitaciones y B) con limitaciones de nutrientes, humedad o profundidad de enraizamiento (Beer et al., 1998; adaptado de Muschler, 1997).

#### 1.4.2. Tipología de cafetales según su diversidad y estructura

Según Moguel y Toledo (1999), en México hay cinco (5) principales sistemas de producción de café, distinguidos de acuerdo al nivel de manejo de la vegetación y a su complejidad estructural: a) Rustico tradicional o de montaña; b) policultivo tradicional; c) policultivo comercial; d) monocultivo con sombra; e) monocultivo sin sombra. (Fig. 1.2). Basados en el trabajo original de Moguel y Toledo (1999), Muschler et al. (2006) describen cuatro (4) tipologías de sistemas de producción (Fig. 1.3), que parten de los sistemas tradicionales con menor modificación y terminan, en concordancia con el orden cronológico durante el desarrollo de la caficultura, con los sistemas más alterados y biológicamente empobrecidos por el ser humano.



**Figura 1.2** Cinco sistemas de crecimiento de café en México, mostrando la complejidad de la vegetación. (Adaptado de Moguel y Toledo, 1999).

**Sistema rusticano.** El sistema rusticano, también llamado sistema de montaña o con sombra natural, incluye una gran diversidad de árboles de sombra de crecimiento natural dentro de los cafetales (Fig. 1.2 y Fig. 1.3). Este sistema partió de un bosque natural aclarado donde se sustituyen plantas arbustivas y herbáceas por cafetos. El dosel del bosque queda básicamente intacto, salvo la extracción ocasional de algunos pocos árboles. Este sistema tiene el menor impacto sobre el ecosistema forestal original, no se aplican agroquímicos y los rendimientos de café son muy bajos (típicamente < 10 quintales/ha/año). Sin embargo,

este sistema genera una gama de otros productos, incluyendo plantas medicinales, leña, frutas silvestres, animales salvajes y otros (Muschler et al., 2006).

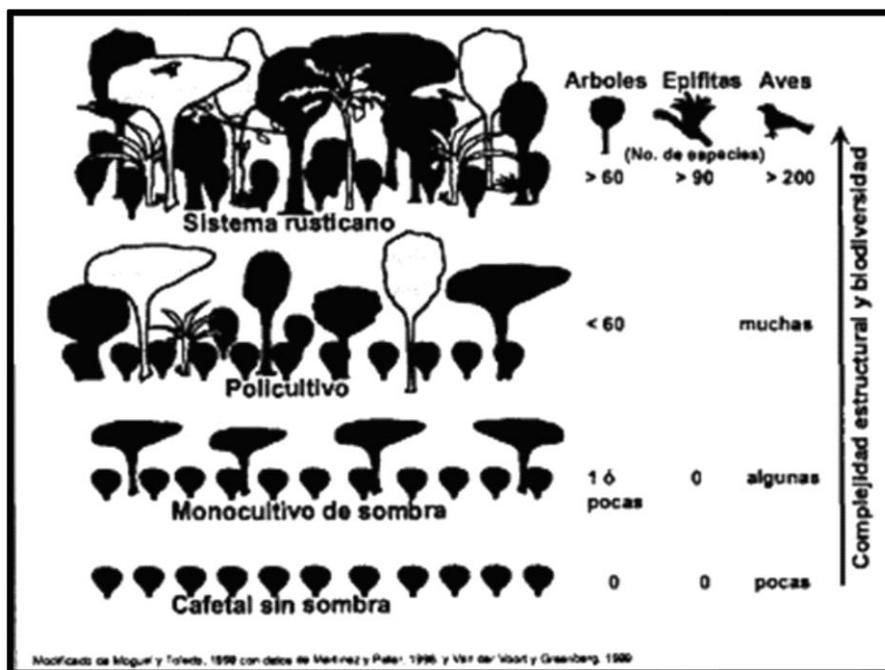


Figura 1.3 Tipología de cafetales según su diversidad y estructura (Adaptado de Muschler et al., 2006).

**Policultivo tradicional.** El sistema llamado policultivo tradicional se basa principalmente en el conocimiento tradicional de culturas indígenas sobre el cultivo de café combinado con una variedad de especies arbóreas y arbustivas (Fig. 1.2). En contraste con el sistema rusticano, se sustituye una porción de los árboles silvestres por árboles plantados a propósito. Muchas veces se trata de frutales o maderables selectos. En general, este sistema mantiene la mayor parte de la biodiversidad del sistema rusticano. En el policultivo tradicional se usan muy pocos, si acaso, insumos químicos. Actualmente, un gran número de los productores de café que cultivan bajo este sistema en México han incursionado en la producción de café orgánico. La producción de ellos ha convertido a México en el mayor proveedor de café orgánico a nivel mundial (Muschler et al., 2006).

**Policultivo comercial.** En contraste con los sistemas anteriores, este sistema se establece al sustituir toda la cobertura forestal original por árboles sembrados con el fin de dar sombra y/o producir algún producto adicional a escala comercial (Fig. 1.2 y Fig. 1.3). Muchas veces, predominan los árboles del género *Inga* o *Erythrina*, combinados con algunos frutales (sobre todo aguacates, cítricos, bananos y plátanos etc.) y/o unos cuantos árboles maderables como cedro (*Cedrela* spp.) o laurel (*Cordia* spp.). En este sistema se utilizan más agroquímicos que en los sistemas anteriores, pero muchas veces restringido a pocos productos (sobre todo fertilizantes) en cantidades moderadas (Moguel y Toledo, 1999).

Los sistemas de policultivo comercial y tradicional (Fig. 1.2) son usados principalmente por medianos y pequeños productores y representan entre el 50 y 60% del área cafetalera en México y en muchos otros países de América Latina donde no hay una intensificación fuerte de la producción (Moguel y Toledo, 1999; Muschler et al., 2006).

**Monocultivo sin sombra o con sombra monoespecífica.** Estos sistemas se refieren a cafetales a pleno sol o con un solo estrato de árboles plantados, para dar un mínimo de sombra y generar materia orgánica de los árboles (Fig. 1.2 y Fig. 1.3). Muchas veces, los árboles pertenecen a un solo género como *Inga* o *Erythrina* y pueden ser podados intensamente. Típicamente, este sistema, usado principalmente por medianos y grandes productores, suele dar los mayores rendimientos de café (> 25 qq café oro/ha/año), pero a cambio de una dependencia fuerte de altos niveles de insumos externos, como fertilizantes y plaguicidas. Consecuentemente, este sistema muchas veces genera el mayor impacto ambiental con niveles elevados de erosión de la biodiversidad y de suelos, acompañado de contaminación de aguas y aire (Muschler et al., 2006).

Aunque la discusión sobre la relación entre la biodiversidad de un ecosistema respecto a su productividad y estabilidad sigue, parece que una mayor diversidad de organismos, incluyendo a microorganismos en suelos, plantas y en las superficies de plantas y animales, genera beneficios importantes, particularmente para la prevención y el control biológico de plagas y enfermedades y para la eficiencia y dinámica del reciclaje de nutrientes (Moguel y Toledo, 1999; Muschler et al., 2006). La mayor disponibilidad de nitrógeno en

suelos bajo manejo orgánico comparado con suelos manejados con agroquímicos corrobora este último punto. Algunos problemas en cafetales convencionales como epidemias de minadores de café (*Leucoptera coffeella*), antracnosis (*Colletotrichum* spp.) y *Cercospora coffeicola* ya han sido atribuidos a la pérdida de diversidad biológica debido a la "intensificación" agrícola (Moguel y Toledo, 1999; Muschler et al., 2006).

Efectos similares han sido observados con epidemias de nematodos y enfermedades de las raíces como resultado de una actividad microbiana empobrecida por la aplicación excesiva de fertilizantes solubles, nematicidas y residuos de herbicidas. En ecosistemas biodiversos estas plagas normalmente son controladas por antagonistas que son favorecidas por suelos con un alto contenido de materia orgánica. En los últimos años también se ha promovido más información sobre el uso de antagonistas para la prevención de epidemias así como el control biológico de plagas y enfermedades (Muschler et al., 2006).

En Colombia, el 95% de los productores de café son de pequeña escala y manejan cerca del 60% del área total cafetalera. Si bien las regiones cafetaleras del país presentan niveles de pobreza relativamente menores al promedio nacional, las condiciones de pérdida de rentabilidad cafetalera y de contracción del empleo y de las inversiones deterioraron las condiciones de vida de estas familias productoras (León, 2007). En consecuencia, en lugar de presionar a los agricultores a controlar el agua de escurrimiento y la pérdida de suelo con la construcción de obras o barreras mecánicas, sugiere que es más beneficioso concentrarse en ayudarles en sus sistemas productivos para mejorar y mantener: a) una cobertura vegetal productiva, la cual protege simultáneamente al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y reduce la erosividad de la misma; b) los niveles y la actividad de materiales orgánicos con referencia a sus múltiples efectos sobre las propiedades físicas, químicas, biológicas e hidrológicas, incluyendo el incremento de la estabilidad y menor erosionabilidad; y c) los espacios y galerías dentro de la arquitectura del suelo, los cuales proveen la porosidad para el intercambio gaseoso, el movimiento del agua y otros aspectos relacionados con el crecimiento y el funcionamiento de las raíces (Shaxson y Barber, 2003).

### **1.4.3. Agricultura de conservación**

La agricultura de conservación se diferencia de un sistema de agricultura convencional por tres factores interrelacionados: a) cobertura permanente del suelo; b) mínima perturbación mecánica del suelo; y c) selección atinada de rotación de cultivos con el fin de interrumpir o detener el ciclo biológico de plagas y enfermedades (Obando et al., 2011).

La agricultura de conservación busca mantener la calidad del suelo mediante el incremento de materia orgánica y la actividad de la fauna del suelo. La cobertura permanente del suelo, ya sea por plantas vivas (cultivos y arvenses de cobertura) o residuos de cosecha y arvenses (otras plantas que no compiten con el cultivo), ejerce una protección al suelo contra el impacto físico de la lluvia y el viento, y regula la humedad y la temperatura en los estratos superficiales del suelo. De esta manera, el suelo se convierte en un hábitat para diversos organismos, desde grandes insectos hasta hongos y bacterias. Los residuos orgánicos contribuyen a mantener o aumentar la actividad biológica del suelo (macro, meso y microorganismos), y en consecuencia, los niveles y la actividad de los materiales orgánicos, con múltiples efectos en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, incluyendo mayor reciclaje de nutrientes, reestructuración de los agregados del suelo y los espacios entre los agregados (Obando et al., 2011).

Tully y Lawrence, (2011) investigaron sobre el balance de nutrientes en sistemas orgánicos, convencionales y agroforestales con café sobre suelos caracterizados como inceptisoles, andisoles y ultisoles, en cuatro localidades cerca a Turrialba – Costarrica, encontraron que se recuperó un porcentaje similar de los nutrientes aplicados tanto en el sistema convencional (aplicación de nutrientes) como en el sistema orgánico. Sin embargo, los excesos de nutrientes (insumos menos salidas) fueron significativos en las granjas con manejo convencional, sugiriendo que estas pueden ser más propensas a las pérdidas de nutrientes. Además encontraron que en general los compartimientos de nutrientes fueron mayores en las granjas no fertilizadas, donde se observó una tendencia a almacenar nutrientes

en la capa superior del suelo, mientras que en las granjas fertilizadas la tendencia fue a almacenar nutrientes en las capas más profundas del suelo.

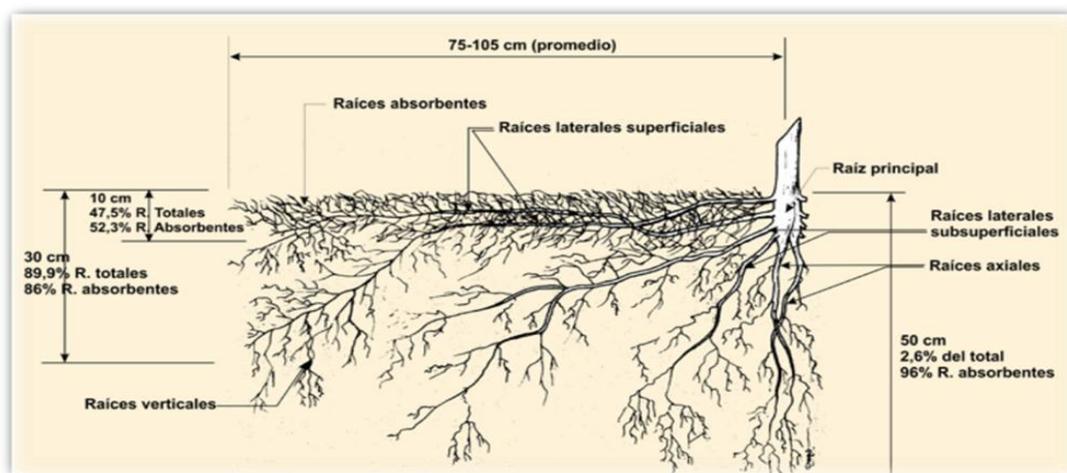
#### **1.4.4. Ecología y condiciones de crecimiento.**

El hábitat natural para todas las especies de café son los bosques tropicales del África. El cultivo del café está bien adaptado a las diferentes condiciones eco-fisiológicas de las tierras altas tropicales (Arábica) y de las tierras bajas (Robusta) (Pohlan y Janssens, 2010). Tanto la altitud como la latitud influyen sobre las condiciones edafo-climáticas óptimas para el cultivo y junto con aspectos como la temperatura, lluvia y suministro de agua, suelo, pendiente, entre otros deben ser considerados cuando se va a determinar donde establecer un cultivo de café (Pohlan y Janssens, 2010).

El café arábica requiere elevaciones entre 1.200 y 2.200 msnm en latitud ecuatorial, pero la altitud óptima puede ser menor a mayores latitudes. Arábica es cultivado entre 25°N y 24°S entre las regiones subtropicales inclinadas hasta las regiones tropicales más elevadas, con requerimientos de temperatura entre los 15 y 30°C. Robusta, consecuente con su origen en África central, está mejor adaptado a los bosques húmedos, calientes y menos elevados de las regiones tropicales. El cultivo crece preferiblemente entre los 15°N y 12°S en áreas planas y elevaciones entre 300 y 800 msnm (Pohlan y Janssens, 2010).

En lo referente a las características de desarrollo y crecimiento de la planta de café, a partir de núcleos de suelos ácidos derivados de micas – esquistos a 1400 m de altitud en el Estado Miranda – Venezuela, sembrados con café arábica var. Mundo Novo (Cuenca et al., 1983), y en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba – Costa Rica, en suelos clasificados como Typic Endoaquepts y Typic Endoaquults plantados con C. arábica cv Caturra (Mora, 2011), se cuantificó la distribución de las raíces finas de los árboles de sombra y del café a una profundidad de 40 cm, con el fin de identificar la distribución vertical de las raíces finas, durante dos períodos de muestreo, incluyendo la capa de hojarasca. En todas las asociaciones las raíces finas de café se concentraron en los

primeros 20 cm de suelo (Fig. 1.4). Además se encontró una gran cantidad de raíces finas de café en la capa de hojarasca, demostrando la importancia de incluir esta capa en la estimación de las raíces finas de café en los sistemas café – sombra (Cuenca et al., 1983; Mora, 2011). En términos generales, en los primeros 30 cm de profundidad se encuentra el 86% de las raíces absorbentes y un 89% de las raíces totales del cafeto (Fig. 1.4), lo que significa que la planta necesita buena disponibilidad de agua y nutrientes a esa profundidad del suelo (Arcila, 2011). Las asociaciones árboles de sombra-café manejadas orgánicamente mostraron incrementos sustanciales en el estado nutricional del suelo y disminución del Al intercambiable, en suelos clasificados como Typic Endoaquepts y Typic Endoaquults plantados con *C. arabica* cv Caturra, en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba – Costa Rica (Mora, 2011).



**Figura 1.4** Morfología y distribución de raíces en una planta de *C. arabica* L. (Adaptado de Suárez de Castro, 1953; en Arcila, 2011).

El cultivo requiere una buena distribución anual de lluvias, una estación seca inferior a 5 meses, y una temperatura anual entre 15 - 30°C. Son tolerantes a la sombra y sus requerimientos para crecimiento son similares a los árboles del bosque, por lo que presentan predisposición a los ecosistemas agroforestales. Los suelos deben ser permeables, tener buena profundidad efectiva, buen drenaje y buena aireación (Pohlan y Janssens, 2010). El crecimiento del café a pleno sol produce más rápida maduración de bayas y mayor

producción de ramas; esto requiere compensación de la sombra, e incremento en el uso de fertilizantes y plaguicidas. En los cultivos tradicionales bajo diferentes niveles de sombra, las bayas maduran más lentamente y tienen menor producción pero la calidad de la bebida y del café verde son superiores. (Pohlan y Janssens, 2010).

Suelos manejados orgánicamente, que de rutina reciben insumos orgánicos, son muy diferentes en su fertilidad, como en otras propiedades que favorecen la calidad del suelo, comparados con suelos manejados convencionalmente (Lyngbaek et al., 2001).

En dos suelos andosoles de Colombia, disímiles en sus porcentajes de M.O.: Paraguaicito con 5% de MO, cuando no se aplicó fertilizantes nitrogenados (dosis cero) sólo se logra el 64% ( $3.790 \text{ kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  de café pergamino seco) de la máxima producción, mientras que en El Libano con 19% de MO bajo las mismas condiciones de clima y fertilización, se alcanzó el 82% ( $3.873 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de café pergamino seco) de la máxima producción. Esta diferencia radica en el aporte del nutriente que proviene del suelo en cada sitio. Se calculó de manera tentativa un aporte de N equivalente a  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  por el suelo con 5% de MO y de  $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  por el suelo con 19% de MO (Sadeghian, 2012).

#### **1.4.5. Café en Venezuela**

Existen varias versiones sobre su introducción en Venezuela: llegó procedente de Brasil en el año 1730. Se sembró por primera vez en las misiones a orillas del río Caroní, y en 1840 habría llegado a Caracas (Menéndez y Sabal, 2009); otra versión es que llegó procedente de semillas de Martinica o de la Guayana Holandesa, introducido por misioneros castellanos entre 1730 y 1732, sembrado por primera vez a orillas del Orinoco, por los años 1783 y 1784, se hizo la primera plantación de café en los jardines de la aldea de Chacao, en la célebre hacienda “La Floresta”, cuya urbanización aún lleva este nombre (Henao-Jaramillo, 1996).

Venezuela cuenta con el llamado eje cafetalero, conformado por: Portuguesa, convertido desde 1979 en el estado mayor productor con 33% de la cosecha anual, representado en 400 mil quintales anuales y una media de 500 mil quintales en tres años. El estado Lara cosechaba el 25%, generando entre estos dos estados más del 50% del café en Venezuela. En menor proporción aparecen los estados Trujillo, Mérida, Táchira, Barinas y otros estados incipientes como Yaracuy y Monagas. El país cuenta con la capacidad y las hectáreas de tierra aptas para el cultivo y para producir entre 3 y 4 millones de sacos de café, desafortunadamente sólo está produciendo 600 mil quintales y el consumo es de 1.200.000 quintales. Es decir la producción es deficitaria y Venezuela actualmente importa café (Ascanio, 2011). Para la cosecha 2002-2003 la producción del café verde venía reduciéndose y estaba en 1.245.000 quintales. Se llama café verde al café como materia prima para ser procesado y curiosamente no emana el olor característico del café tostado. La denominación verde no implica el grado de maduración, si no que no ha sido “tostado”. Se estimaba que el área dedicada al cultivo era de 230.000 hectáreas con rendimiento promedio de 5,5 quintales/ha (1 QQ=46 kg.) (Menéndez y Sabal, 2009). Según el periódico El Universal, sábado 24 de diciembre de 2011, Fedegro reportó que la producción de café en Venezuela se situó en 785 mil quintales respecto 1 millón 150 mil quintales en 2010.

Esta producción es considerada la producción más baja en la historia del país. <http://newsgroups.derkeiler.com/pdf/Archive/Soc/soc.culture./venezuela/2011/12/msg02965.pdf>.

#### **1.4.6. Origen y distribución**

La especie *Coffea arabica* es originaria de las tierras altas en bosques lluviosos (selvas tropicales) del suroeste de Etiopia (Fig. 1.5). Las variedades de *C. canephora*, incluyendo Robusta, crecen a menor altitud y se adaptan bien a la zona ecuatorial, trópicos húmedos y calientes por debajo de 1000 m; se dan naturalmente en la cuenca oeste del Congo. Café Robusta es resistente a la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) por lo que con la

expansión del cultivo, reemplazó al arábica en los lugares donde la roya del cafeto devastó este cultivos (Pohlan y Janssens, 2010).

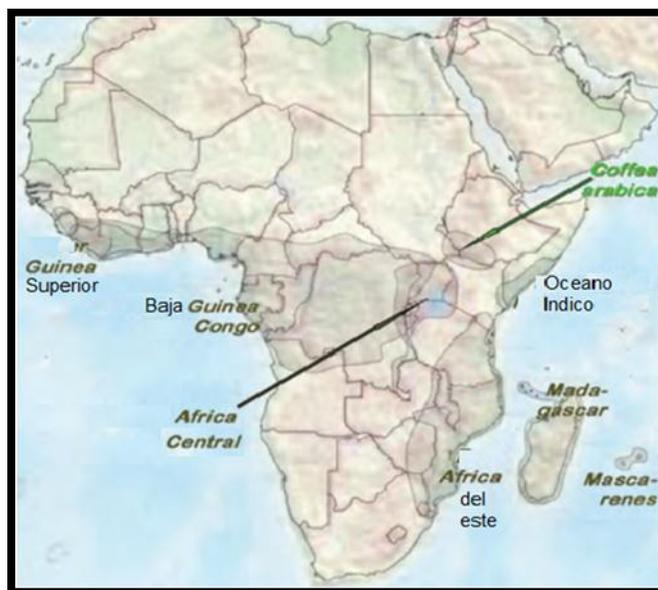


Figura 1.5 Mapa de distribución: origen del café. Tomado de Oestreich-Janzen (2013)

#### 1.4.7. Variedades y clasificación

El género *Coffea*, comprende alrededor de 70 especies, pertenecientes a la familia de las Rubiaceae. Esta es una de las más importantes familias de dicotiledóneas donde los pétalos de las flores están fusionados. Sólo hay tres especies de café de importancia comercial:

*Coffea arabica* Linné – Esta especie se divide en varias variedades, algunas de tallo alto y otras enanas. Es una especie tetraploide ( $4n = 44$ ) que produce un café superior, combinando gusto y bajo contenido en cafeína con buen aroma. Son generalmente susceptibles a la roya del cafeto y por ser las variedades más difundidas se hacen más susceptibles (Pohlan y Janssens, 2010). Existen más de 200 variedades arábica, entre las más importantes de tallo alto:

Típica: se cultiva principalmente en Brasil.

Bourbon: produce hasta un 25% más que Típica.

Mundo Novo: es un cruce natural entre Bourbon y la variedad Sumatra.

Pache común y Pache colis: ambas son mutaciones de típica.

Las más importantes variedades enanas son:

Caturra: es una mutación de Bourbon, originaria de Brasil, conocida por su productividad y buen gusto.

Catuaí: es un cruce entre Caturra y Mundo Novo.

Catimor: un cruce entre Caturra y el híbrido de Timor.

*Coffea canephora* Pierre – Es una especie diploide ( $2n=22$ ), con inferior gusto pero mayor producción, además son resistentes contra la roya del café (*Hemileia vastatrix*), nematodos de la raíz (*Meloidogyne exigua*, *M. incognita*, entre otros) y a la enfermedad de las cerezas del café (*Colletotrichum kahawae*). Esta especie se divide en muchas variedades pero las más importantes comercialmente son:

Robusta: la variedad más común.

Conilon: cultivada principalmente en Brasil.

Kouilou o Kwilu: con frutos y granos más pequeños que Robusta.

También existen híbridos entre *C. arábica* y *C. canephora*, algunos naturales como el híbrido de Timor, y algunos artificiales, como el Arbusta creado en Costa de Marfil.

*Coffea liberica* Hiern – Especie diploide ( $2n=22$ ) la cual incluye variedades como: var. *liberica*, var. *dewevrei* y var. *excelsa*. Aunque combinan buena rusticidad y resistencia, estas son conocidas por su sabor picante y a tierra, por lo que tienen poco valor comercial (Pohlan y Janssens, 2010).

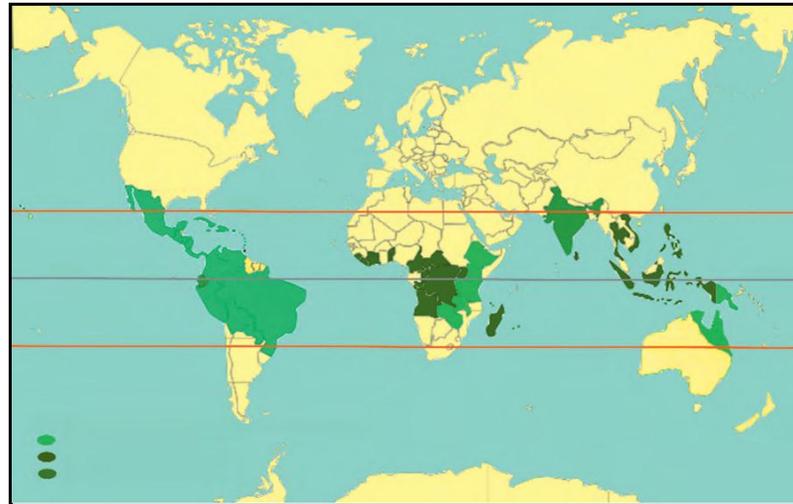
El café es un cultivo bien adaptado a las diferentes condiciones eco-fisiológicas de los trópicos (Fig. 1.6). *C. arábica* está adaptado a temperaturas frías de tierras altas en los trópicos, por encima de 1000 msnm alrededor del Ecuador. Necesita por lo menos siete (7) meses de lluvia pero relativamente alta temperatura para una abundante diferenciación de los botones florales (Pohlan y Janssens, 2010). El mejoramiento de varias especies de plantas cultivadas ha tenido especial interés en la reducción del tamaño de las plantas, en vista de la

facilidad de recolecta, mayor densidad de plantas con la consecuente mayor producción (Carvalho y Monaco, 1972; Benavides y Gutiérrez, 1978).

De entre los cultivares de porte pequeño, el cultivar Caturra tal vez sea uno de los de mayores posibilidades desde el punto de vista de adaptación y capacidad productiva a las condiciones de las principales zonas cafetaleras de Brasil (Carvalho y Monaco, 1972). Los análisis genéticos revelan que sus principales características son controladas por el par de alelos dominantes denominados Caturra CT. La acción de estos genes se manifiesta por la reducción de la longitud de los entrenudos, dando a la planta una forma más compacta y de menor altura. Las hojas adultas son color verde oscuro, los brotes nuevos son verdes y las raíces bien desarrolladas. La capacidad productiva es alta, probablemente por el mayor número de inflorescencias por axila y mayor número de flores por inflorescencia (Carvalho y Monaco, 1972; Benavides y Gutiérrez, 1978).

El cultivar Catuaí se originó a partir de las transferencias de genes de porte reducido en la variedad Mundo Novo, entre las hibridaciones realizadas en 1949 que dieron origen al café Mundo Novo CP 374-19, el cual se cruzó con la planta 476-11 Caturra amarillo. El resultado del cruzamiento recibió el número H-2077 (Carvalho y Monaco, 1972). A partir de la F1 (H-2077) los autores llegaron hasta la cuarta generación: F4, cuyas plantas mostraron uniformidad razonable, alto rendimiento y producción temprana. Entonces se liberaron dos variedades llamadas Catuaí amarillo y Catuaí rojo, las plantas son más pequeñas que las de la variedad Mundo Novo, presentan ramificaciones secundarias y terciarias fuertes, por lo que estas variedades han sido cultivadas a gran escala reemplazando a las variedades de porte alto (Carvalho y Monaco, 1972). La variedad Catuaí reportó mayor altura de planta (184,91 cm), mayor diámetro de tronco (42,08 mm) y altura del tronco de la planta hasta la primera bandola (19,9 cm), siendo entonces la variedad que reporta las mayores dimensiones comparada con las variedades Caturra y Bourbon (López, 2006). El tamaño del fruto es más largo (16,36 mm), más ancho (12,45 mm), y más grueso (8,1 mm) en la variedad Catuaí comparado con aquellos de los cultivares Caturra y Bourbon. La variedad Catuaí también reporta el mayor número de flores por bandola (28), comparado con las variedades Bourbon

(25) y Caturra (21); esto está directamente relacionado con el número de frutos formados y con los rendimientos, siendo la variedad Catuaí la más rendidora de las tres (3) (López, 2006).



**Figura 1.6** Países productores de café en el mundo. (Adaptado Oestreich-Janzen, 2013).

Los datos de producción obtenidos por Benavides y Gutiérrez (1978), muestran claramente la superioridad del Catuaí rojo en rendimiento por planta y por área, así como la relación cereza-oro, que indica el rendimiento en el beneficiado, comparado con las variedades Caturra, Mundo Novo, Híbrido Tico, 'Geisha T -2722' y 'K.P. 423'. Las mejores variedades para sistemas de café orgánico en Costa Rica son Caturra y Catuaí, son las variedades que producen más; las plantas son más pequeñas y se cosechan con menos trabajo. Las distancias recomendadas entre hileras y entre calles son: Catuaí; 1 y 2 m respectivamente; y para Caturra; 0,9 y 1,9 respectivamente. Estas distancias pueden ampliarse en las zonas más bajas, calientes y húmedas, y reducirse en las zonas altas y frías, según se recomiende con base en investigación oficial y experiencia de agricultores. Estas variedades producen más porque tienen un sistema radical muy fuerte, y un follaje más denso: más ramas, más nudos, más flores y más frutos (OIRSA, 2000).

#### **1.4.8. Parámetros bioquímicos**

La definición de Calidad del Suelo, tendrá varias connotaciones dependiendo del uso al cual se destina o destinará un suelo en particular. Desde un punto de vista sostenible se ha definido como su capacidad para mantener sus funciones biológica, y ambiental, promoviendo además la salud de animales, plantas y el propio ser humano (Doran y Parkin, 1994). La actividad de las enzimas del suelo se han sugerido como indicadores adecuados de la calidad del suelo debido a que: a) son medidas de la actividad microbiana del suelo y por lo tanto están estrictamente relacionadas con las transformaciones y ciclos de nutrientes; b) pueden responder rápidamente a cambios en el suelo causados por factores naturales y/o antrópicos y c) son fáciles de medir (Nannipieri et al., 2002; Puglisi et al., 2006). Una buena calidad y salud de un suelo, requiere de la integración del desarrollo de buenas propiedades físicas, químicas, biológicas y bioquímicas, que permitan el establecimiento y sostenibilidad de la calidad, salud y fertilidad del suelo (García et al., 2003). Para cuantificar la calidad de un suelo es necesario disponer de una serie de parámetros que puedan reflejar los problemas de producción en las diferentes áreas existentes, además de ser capaces de monitorizar cambios en la calidad relacionados con los diferentes agentes causantes, los parámetros relacionados con actividad metabólica son los que mantienen una mayor sensibilidad frente a procesos no deseables como contaminación, degradación por diversas causas, e incluso desertificación (García et al., 2003).

El estudio de la relación de los microorganismos con la calidad del suelo, su degradación o recuperación se basa en la estimación de la actividad microbiana en el ambiente determinado objeto de investigación. Los parámetros bioquímicos pueden constituir un excelente punto de partida en dicho estudio (García et al., 2003). Madejón et al., (2007), estudiaron los efectos a largo plazo de la labranza de conservación versus labranza tradicional sobre el estado biológico de un suelo, bajo sistema de rotación de cultivos, encontrando mayores incrementos en el contenido de materia orgánica, carbono de la biomasa microbiana (CBM) y actividades enzimáticas (deshidrogenasa, fosfatasa alcalina,  $\beta$ -glucosidasa, y proteasa) en la capa superior del suelo (0 – 5 cm) bajo labranza de conservación que en labranza tradicional. Los valores para el CBM fueron menores en las

muestras tomadas en verano que en las tomadas en otoño probablemente debido a la disminución del C disponible y también por la menor humedad del suelo, lo cual puede afectar el crecimiento microbiano.

#### **1.4.9. Biomasa Microbiana del Suelo.**

La biomasa microbiana ha sido definida como la parte viva de la materia orgánica del suelo excluida las raíces de las plantas y los animales de tamaño mayor de  $5 \text{ a } 10 \mu\text{m}^3$ . Elocuentemente David S. Jenkinson (Rothamsted Research, UK) la describe como “el ojo de la aguja a través del cual toda los materiales orgánicos deben pasar”, ya que éstos son descompuestos a componentes inorgánicos simples como agua, dióxido de carbono, nitrato, fosfato y sulfato que las plantas pueden usar nuevamente. Generalmente se expresa en miligramos de carbono (nitrógeno, fósforo según sea el caso) por kilogramo de suelo seco o en microgramos por gramo de suelo seco. A pesar de su pequeño tamaño es un componente vital de la fracción orgánica del suelo siendo por un lado un reservorio lábil de C, N, P y S y por otro lado un agente descomponedor de los restos vegetales y animales, así como también para la formación del humus del suelo (Jenkinson y Ladd, 1981).

La diversidad microbiana es un término general que se utiliza para incluir diversidad genética, que es la cantidad y distribución de la información genética, entre las especies microbianas, diversidad de especies de bacterias y hongos en las comunidades microbianas; y diversidad ecológica, que es, la variación de la estructura de la comunidad, complejidad de interacciones, número de niveles tróficos y número de grupos. La diversidad microbiana es medida por varias técnicas como el tradicional conteo directo y conteo en placas, como también el nuevo procedimiento de biología molecular y análisis de ácidos grasos (Nannipieri et al., 2003).

Una hipótesis alternativa para explicar la gran diversidad microbiana en la superficie del suelo está basada sobre la presencia de gran variedad y contenido de compuestos orgánicos, que además es favorecida por la mezcla y transporte que realiza la fauna del suelo

y la estabilidad de las comunidades en las biopelículas de la interface entre las raíces y el suelo, las cuales son poco afectadas por los procesos de humedecimiento y secado (Tiedje et al., 2001). La reducción en cualquier grupo de especies microbianas no ha tenido efectos significativos sobre los procesos generales del suelo, debido a que otros microorganismos pueden llevar a cabo aquellas funciones. Este comportamiento hace pensar que las funciones típicas de los suelos son redundantes y podría explicar la razón por la cual no se ha observado ninguna disminución en la relación entre la diversidad microbiana y las funciones del suelo (Nannipieri et al., 2003; Griffiths et al., 2001).

La comprensión y conocimiento de las relaciones entre la comunidad microbiana y las funciones del suelo son pobres porque no se puede medir con facilidad la diversidad microbiana, ni aún si se pudieran detectar microorganismos no cultivables, por técnicas moleculares. Además los ensayos actuales usados para medir funciones microbianas, determinan el índice general de los procesos metabólicos globales, como respiración o actividades enzimáticas específicas, sin identificar las actividades microbianas específicas implicadas (Nannipieri et al., 2003). Las plantas ejercen una fuerte influencia sobre la composición de las comunidades microbianas del suelo, como resultado de la rizodeposición y la descomposición de la hojarasca y las raíces. La estricta relación entre las especies de plantas y las comunidades microbianas en la rizosfera del suelo ha sido el resultado de la coevolución (Nannipieri et al., 2003).

#### **1.4.10. Indicadores de calidad y salud del suelo**

Los sistemas bióticos del suelo son extremadamente complejos y la evaluación de la salud del suelo y la función de los ecosistemas mediante medidas directas es poco práctico, por lo tanto es conveniente desarrollar métodos de evaluación indirectos (FAO, 2003). Debido a que los procesos y las funciones del suelo en los ecosistemas son complejos, los equipos científicos concuerdan en que evaluar la calidad del suelo requiere la integración de varias clases de datos que incluyan las propiedades físicas, químicas y biológicas (Seybold et al. 1999; FAO, 2003; Brookes et al., 2011).

El concepto de calidad del suelo se refiere a la capacidad de una clase específica de suelo para ejecutar funciones definidas dentro de los límites de un uso específico de la tierra, sin afectar adversamente el medio ambiente, la salud animal y humana, y la productividad del suelo (Karlen et al., 1997; Letey et al., 2003). Esta definición basada en la función, refleja la vida y la naturaleza dinámica del suelo. La conceptualización de la calidad del suelo requiere la integración de tres componentes principales: a) productividad biológica sostenida; b) la calidad ambiental c) la salud vegetal y animal (Karlen et al., 1997). Por su parte, la resiliencia del suelo se puede definir como la capacidad de un suelo para recuperar su integridad estructural y funcional después de una perturbación o disturbio. La integridad estructural está ligada a las funciones específicas del suelo y al arreglo físico de las partículas primarias, su agregación, la distribución de poros por tamaño y la conectividad de los mismos (Seybold et al., 1999).

La calidad del suelo puede evaluarse desde diferentes escalas, como también puede verse de dos formas distintas: a) como una característica inherente de un suelo, o b) como la condición o la salud del suelo. La calidad inherente de un suelo se rige por procesos formadores del suelo, o sea, cada suelo tiene una habilidad natural para funcionar. Esta característica inherente puede ser definida por un rango de parámetros cuyos valores reflejan el potencial ideal del suelo para realizar una función específica. El segundo método es evaluar la calidad de un suelo que está funcionando al potencial ideal para un uso específico (quizás a través de la adopción de “mejores prácticas de manejo”), este suelo tiene excelente calidad; mientras que si ese suelo está funcionando muy por debajo de su potencial ideal, se puede concluir que está deteriorado o tiene pobre calidad (Karlen et al., 1997). La identificación apropiada de indicadores para la evaluación de calidad del suelo se complica porque estos deben dar cuenta, tanto de las múltiples dimensiones de las funciones del suelo (tales como la productividad y calidad ambiental), como de los factores físicos, químicos y biológicos que controlan los procesos biogeoquímicos, y su variación en el tiempo y el espacio (FAO, 2003).

Las actividades de las enzimas han sido estudiadas para evaluar la respuesta de las funciones del suelo ante cualquier perturbación (contaminación, incendios, labranza, entre

otros), o a los cambios en los factores o prácticas de manejo (Nannipieri et al., 2012). Debido a su origen principalmente microbiano, las actividades enzimáticas pueden ser usadas como indicadores o biosensores para detectar cambios tempranos en la biología y bioquímica del suelo causados por diferentes formas de manejo y por factores ambientales (Paolini, 2011), y por ende en la calidad del suelo (Karaca et al., 2011). Las enmiendas orgánicas generalmente aumentan la actividad enzimática en suelos, al estimular el crecimiento microbiano, cuando no están presentes sustancias tóxicas como metales pesados o si el efecto estimulador en el componente orgánico de la enmienda enmascara el efecto inhibitorio del contaminante (Nannipieri et al., 2012). El incremento en la actividad enzimática también puede ser debido al aumento de la actividad de complejos orgánico-enzimáticos extracelulares, que son añadidos con las enmiendas o residuos orgánicos que estabilizan las enzimas extracelulares al incrementar la actividad microbiana. Los cambios climáticos tales como aumento de la temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y más frecuentemente ciclos de humedecimiento y secado, pueden afectar la composición y actividad microbiana y retorno de la materia orgánica, con efectos sobre las enzimas extracelulares estabilizadas y actividad de enzimas asociadas a las células microbianas (Nannipieri et al., 2012). Se debe tener presente también que las actividades de las enzimas extracelulares estabilizadas pueden ser independientes de la biomasa y actividad microbiana en un momento particular (Brookes et al., 2011).

#### **1.4.11. Índices de Calidad del Suelo**

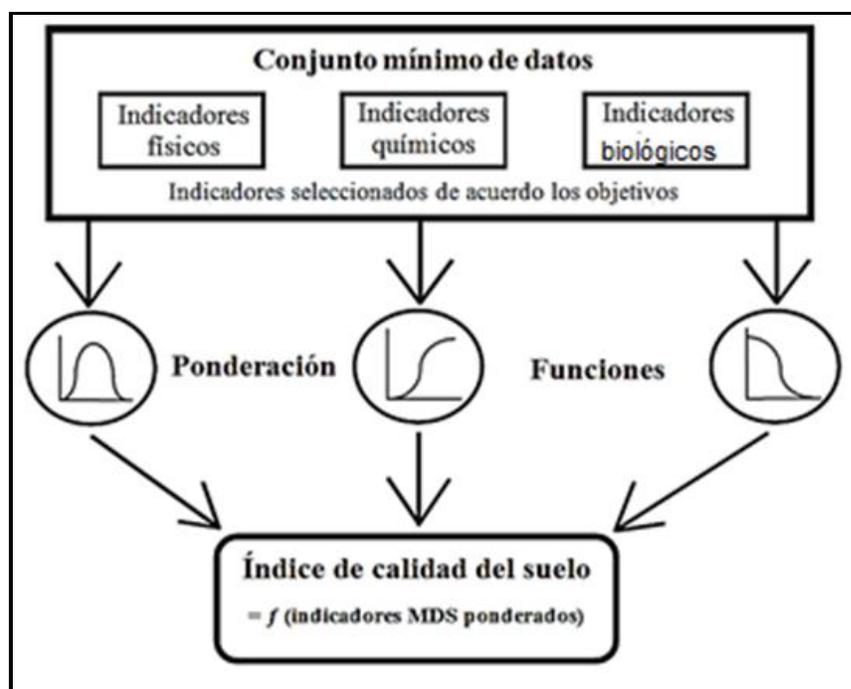
Las propiedades del suelo basadas en actividades biológicas y bioquímicas, especialmente las involucradas en el flujo de energía y ciclaje de nutrientes, han demostrado responder a pequeños cambios en las condiciones del suelo, por lo tanto proporcionan información sensible a alteraciones sutiles de la calidad del suelo (García-Ruiz et al., 2008; Brookes et al., 2011). Todos los estudios sobre los índices de calidad del suelo apuntan a la complejidad del tema ya que un conjunto de propiedades físicas, químicas, microbiológicas y bioquímicas deben integrarse para establecer tal calidad (Bastida et al., 2008). Los indicadores físicos y químicos son de suma importancia para evaluar la calidad del suelo por

los agricultores, principalmente desde el punto de vista agronómico. Sin embargo los indicadores biológicos son más sensibles a los cambios que los físicos y químicos, y podrían describir la calidad del suelo desde un panorama más amplio (Bastida et al., 2008; Brookes et al., 2011). Debido a la complejidad de la composición y función del suelo, un buen indicador de su calidad debe integrar la combinación de un número de mediciones en una medida cuantitativa y fácil de entender (García-Ruiz et al., 2008).

El rápido desarrollo demográfico en todo el mundo tiende a generar un alto impacto sobre la calidad del suelo. Cuando se requiere cuantificar la dinámica de la calidad del suelo (aspectos de la calidad del suelo en relación con las propiedades del suelo que cambian con el uso y manejo de ese suelo), se requiere de herramientas sensibles y precisas para evaluar los cambios en la calidad del suelo en un corto plazo (Bastida et al., 2008). Tanto la opinión de expertos como los métodos estadísticos, fundamentalmente el método de análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), son válidos para seleccionar un conjunto mínimo de indicadores que permitan establecer la calidad del suelo en un sistema de producción vegetal (Andrews et al., 2002). A pesar de que son fácil de aplicar, el uso de dos (2) parámetros en un índice de calidad del suelo, tiene las mismas limitaciones que aquellos índices con un parámetro: la falta de información. Por tanto para obtener índices que proporcionen y se acerquen más a la información sobre la calidad de un suelo se han desarrollado los índices multiparamétricos, para agroecosistemas y suelos no agrícolas (Bastida et al., 2008). Dado que las enzimas del suelo difieren en su origen, función y ubicación dentro de la matriz del suelo, y responden a diferentes señales ambientales, será útil condensar la información que ellas proporcionan en un solo valor numérico. Por lo tanto se han desarrollado índices complejos, calculados por medio de combinaciones algebraicas de las diferentes propiedades bioquímicas del suelo o por análisis multivariado. Entre las alternativas para este caso, el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis factorial son los más frecuentemente usados (García-Ruiz et al., 2008). Cuando los objetivos de manejo se enfocan en la sostenibilidad más que en el simple rendimiento de los cultivos, los índices de calidad del suelo pueden ser vistos como un componente jerárquico dentro de una jerarquía de sostenibilidad del agroecosistema, siendo un factor que contribuye a la evaluación de los objetivos de manejo sostenible de alto nivel (Andrews et al., 2002). Una

vez que los objetivos de manejo se identifican, la indexación de la calidad del suelo consta de tres pasos: (1) escoger los indicadores apropiados para un mínimo conjunto de datos (2) transformación de los indicadores puntuales (estandarización) y (3) combinación de los indicadores puntuales dentro del índice (Andrews et al., 2002). Tal como se observa en la Fig. 1.7.

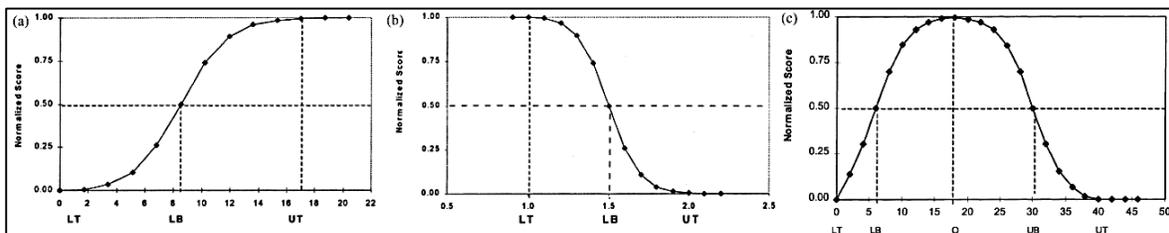
La creación de índices de calidad del suelo, tradicionalmente siguen el método descrito por Andrews et al. (2002), el cual consiste en seleccionar los parámetros apropiados, transformar y ponderar los mismos y luego combinar los resultados numéricos en un índice. Para ello, se seleccionan los parámetros con mayor peso obtenidos en el resultado de un análisis factorial o de componentes principales y/o análisis discriminante.



**Figura 1.7** Modelo conceptual para convertir el conjunto mínimo de datos a valores del índice (Adaptado de Andrews, 1998; Karlen et al., 2003).

Glover et al., (2000) plantean tres tipos de parámetros basados en la idea: a) “más es mejor” señalando los parámetros que al aumentar su contenido o concentración, mejoran

la calidad del suelo como por ejemplo el contenido de materia orgánica, las actividades enzimáticas, entre otros.; b) “menos es mejor” aquellos que al disminuir su valor mejoran la calidad del suelo como por ejemplo la conductividad eléctrica, el sodio intercambiable, la densidad aparente, entre otras y c) “óptimo” como aquellos que presentan un intervalo particular de valores como por ejemplo el pH, el fósforo disponible, el contenido de micronutrientes, entre otros. Posteriormente se normalizan las tendencias con diversas ecuaciones diseñadas por cada investigador que involucran variables como el valor máximo de la función, el valor medio para cada variable, el valor de la pendiente, entre otros; así como también se busca que las curvas obtenidas varíen entre 0 y 1 de una manera adecuada (Fig. 1.8). Paolini et al., (2014) desarrollaron diversos índices de calidad de suelos a partir de la media geométrica y funciones discriminantes de las actividades enzimáticas (deshidrogenasa, amonificación de arginina, hidrólisis del diacetato de fluorisceína (DAF), fosfatasa ácida,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa, proteasa benzoil argininamida y caseinasa) en suelos a nivel superficial (0-5 cm) de varias fincas cafetaleras en los estados Mérida y Trujillo bajo manejo tradicional, convencional y orgánico, la cual fue capaz de discriminar entre los tres (3) tipos de manejo, asignándole el mayor índice de calidad de suelos a aquellas fincas con manejo orgánico seguido del manejo tradicional y por último el manejo convencional.



**Figura 1.8** Curvas de respuesta de los indicadores. a) “Mas es mejor”, agregados estables; b) “Menos es mejor”, densidad aparente; y c) “Optimo”,  $\text{NO}_3\text{-N}$  (kg/ha). LT = umbral inferior, LB = línea base inferior, UT = línea base superior, O = óptimo (Glover *et al.*, 2000).

## **CAPITULO II**

### **FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS COMO INDICADORES DE CALIDAD, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ.**

#### **2.1. INTRODUCCION**

Tradicionalmente los estudios del suelo se han enfocado en la determinación de su productividad, para lo cual se ha tenido la fertilidad del mismo como el principal factor determinante de dicha productividad. Generalmente se ha definido la fertilidad como la potencialidad física, química y biológica del suelo, para sostener las plantas y suministrar los elementos esenciales (agua y nutrientes) para su crecimiento, desarrollo y producción (Malavolta, 2006), en ese sentido, para evaluar la fertilidad del suelo se recomienda hacer análisis físicos y químicos, cuyos resultados sirven de guía para determinar la cantidad de cada nutrimento y en ocasiones la aplicación de enmiendas con el fin de corregir acidez o remediar otros tipos de problemas como la deficiencia nutricional, la compactación y las limitaciones en la aireación y retención de humedad entre otros (Malavolta, 2006; Sadeghian, 2012). Es difícil separar con claridad los procesos físicos, químicos y biológicos dentro de las funciones del suelo, debido a la naturaleza dinámica e interactiva de estos procesos. La materia orgánica juega un papel importante en casi todas las funciones del suelo, en general, los procesos microbiológicos junto con los fisicoquímicos determinan la capacidad del suelo para mantener, suministrar los nutrientes y sostener su ciclaje, así como el movimiento y disponibilidad de agua (Schoenholtz et al., 2000).

Las principales propiedades químicas y físicas estudiadas como indicadores de la calidad y/o capacidad para el suministro de nutrientes de suelos agrícolas, de pastizales y forestales, se muestran en las tablas 2.1 y 2.2.

Un suelo con buenas propiedades físicas podrá cumplir adecuadamente con algunas funciones como: a) permitir el crecimiento y buen desarrollo radicular, b) permitir un

adecuado flujo de infiltración y percolación de agua, c) almacenar, retener y suministrar agua, d) permitir un adecuado intercambio gaseoso, e) facilitar buena actividad biológica. Todos estos factores podrían determinar el grado en el cual cada propiedad o proceso en el suelo es útil para medir la calidad del suelo y monitorear el mantenimiento de la calidad del suelo a través del tiempo (Schoenholtz et al., 2000).

**Tabla 2.1** Propiedades químicas como indicadores de calidad y suministro de nutrientes en suelos agrícolas, de pastos y de bosques, (Adaptado de Schoenholtz et al., 2000).

<b>Indicador</b>	<b>Importancia o utilidad</b>
C org.	Datos para suelos agrícolas
	Características químicas como indicador de calidad del suelo.
	Como indicador biológico de la calidad de suelos con diferentes sistemas de manejo de pastos
	Correlación con el rendimiento de cultivos en diferentes tipos de suelos
MOS	Propuesto como indicador químico
	Evaluación cualitativa de la salud química en suelos agrícolas
	Puede medir simultáneamente varias funciones del suelo
N Total	Evaluación de calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo de pastos
P Total	Evaluación de calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo de pastos
P asimilable	Evaluación de calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo de pastos
CIC	Evaluación de calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo de pastos
	Propuesto como indicador químico
pH	Características químicas como indicador de calidad del suelo
	Evaluación de calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo de pastos
	Evaluación cualitativa de la salud química en suelos agrícolas
CE	Datos para suelos agrícolas
	Características químicas como indicador de calidad del suelo
	Índices de calidad en recuperación de suelos mineros

**Tabla 2.2** Propiedades físicas como indicadores de calidad del suelos, usados o recomendados por investigadores del suelo (Adaptado de Schoenholtz et al., 2000).

<b>Indicador</b>	<b>Contribución a la calidad del suelo</b>
Textura	Transporte y retención de agua y nutrientes
Densidad aparente	Crecimiento radicular, tasa de movimiento de agua, expresión del volumen de suelo
Capacidad de Retención de Agua (CRA)	Disponibilidad de agua para las plantas, erosividad
Conductividad hidráulica saturada	Balance agua – aire, regulación hidrológica
Estabilidad de los agregados	Crecimiento radicular, balance agua – aire

## **2.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGROECOLÓGICOS CON CAFÉ.**

En un estudio realizado en áreas del valle del Rift en Etiopía, sobre el uso del suelo en un andosol tropical, se comparó dos sistemas agrícolas cultivados con cultivos anuales durante las últimas cinco décadas versus un sistema agroforestal con café, establecido hacía 34 años. Se observó mayor estabilidad y mayor tamaño de los agregados del suelo, en el sistema agroforestal con café, observándose además un mejor desarrollo de la estructura del suelo. En este mismo sistema, también encontraron los valores más altos de COT y NT (Abera y Wolde-Meskel, 2013).

Partelli et al. (2007) investigaron en plantaciones de café localizadas en la zona de Mata, Minas Gerais en Brasil, con clima tropical, establecieron y compararon dos métodos para el diagnóstico nutricional, el método Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS por su sigla en inglés) y el enfoque de Rango de Suficiencia. Estos métodos se establecieron en plantaciones con producción promedio bianual igual o superior a tres (3) toneladas por hectárea. Las concentraciones foliares de nitrógeno, fósforo y azufre fueron mayores en verano, mientras los iones hierro y manganeso fueron superiores en invierno. Estos autores además encontraron diferencias en el diagnóstico nutricional foliar entre el método DRIS y el enfoque del Rango de Suficiencia, cobre, azufre, potasio y zinc fueron

considerados los nutrientes limitantes según el análisis DRIS, mientras que manganeso, azufre, potasio y calcio fueron limitantes cuando se usó el rango de suficiencia.

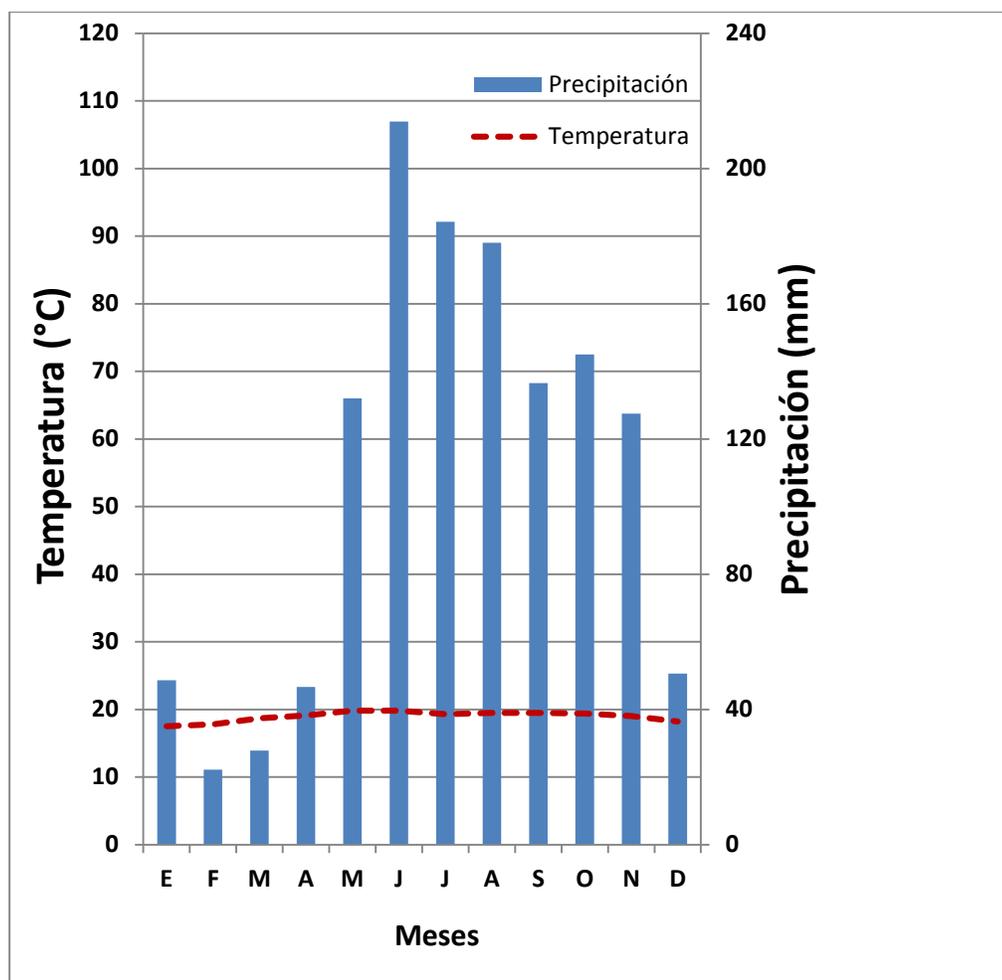
Partelli et al. (2012) evaluaron el efecto del café Canilon (*Coffea canephora*) cultivado bajo sistemas de manejo orgánico y convencional sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo, en la región de Jaguaré en el estado Espíritu Santo en Brasil, a profundidad de 0 – 10 cm y 10 – 20 cm en dos estaciones: invierno y verano. Estos investigadores encontraron mayores concentraciones de los elementos fósforo, potasio, magnesio, calcio y manganeso en la capa superior de suelos bajo manejo orgánico mientras que en los suelos bajo manejo convencional encontraron mayores valores para los elementos azufre, hierro, zinc y cobre.

En este estudio, se evaluaron algunas propiedades físicas y químicas del suelo, con el fin de correlacionarlas con las propiedades microbiológicas y bioquímicas, e igualmente para la formulación de un índice integral de la calidad del suelo.

## **2.3. MATERIALES Y METODOS**

### **2.3.1. Descripción del sitio**

La estación experimental Jaime Henao Jaramillo de la UCV (Universidad Central de Venezuela), Municipio Baruta, Estado Miranda se encuentra en las coordenadas 10° 22' 24" N; 66° 54' 04" W, a 1241 msnm. Presenta un ambiente montañoso de relieve accidentado con un desnivel máximo de 342 m (cotas 1130 - 1472 m) y pendiente promedio de 50 % que incluye áreas de formas fisiográficas variadas: lomos (5-30 %), laderas (35-75 %) y vegas (3-5 %). La estación ocupa una superficie de 379,32 ha, presenta una temperatura media de 19,9 °C, humedad relativa de 83,8 % y precipitación anual media de 1321,5 mm/año (las isoyetas fluctúan entre 1200 y 1350 mm), siendo los meses húmedos de mayo a noviembre y los meses secos y fríos (diciembre a abril) (Fig. 2.1; Del Pozo et al., 2011).



**Figura 2.1** Climadiagrama de la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel, estación 5191 en INAHMET).

En la estación existen aproximadamente 15 ha sembradas con las variedades de café: Caturra y Catuaí. La zona de estudio se ubicó en las cercanías de las instalaciones del central de procesamiento del café denominado Los Mohomos de la Estación, situado aproximadamente a 1325 msnm y se establecieron dos parcelas continuas sembradas con las dos variedades. La superficie de estudio fue de una hectárea para cada variedad y estos suelos fueron descritos como Humic Haplults, francosa fina, mixta, isohipertérmica por Iskandar y Sedek (1995) (citado por Torres et al., 2009). Las plantaciones con la variedad Catuaí tienen una edad aproximada de 20 años, las plantaciones con la variedad Caturra en los suelos del estudio, se establecieron hace aproximadamente 8 años, en suelos que venían sembrados con

la variedad Catuaí. La densidad de siembra para la variedad Caturra es de 6.410 plantas por ha; para la variedad Catuaí es de 4.200 plantas por ha y la densidad de los árboles de sombra es 44 árboles por ha en promedio. El sitio experimental es un agroecosistema de café bajo sombra de guamos (*Inga spp*) y bucares (*Erythrina poeppigiana*) sin aplicación de insumos agrícolas, lo cual corresponde a una fertilización orgánica pasiva, ya que los únicos insumos recibidos por el suelo solo provienen del mantillo formado por residuos de árboles de sombra y café.

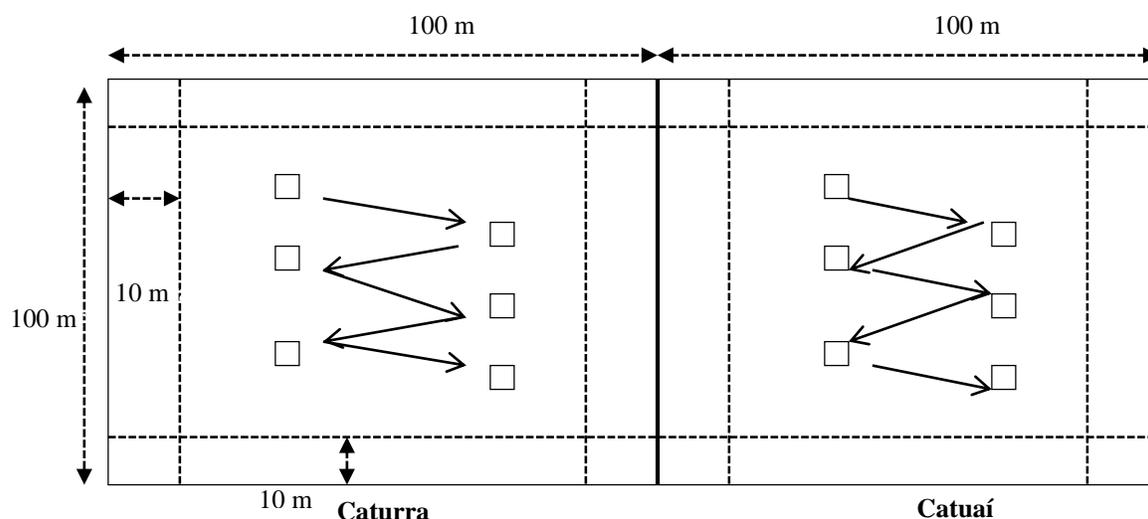
Iskandar y Sedek (1995) (citado por Torres et al., 2009) describen los suelos como Typic Kanhaplohumults, arcillosa, mixta, isohipertérmica (Carretera hacia la Roya MIR-1); Oxic Humitropepts, francosa fina, mixta, isohipertérmica (Final Carretera de la Roya MIR-2) y Humic Haplults, francosa fina, mixta, isohipertérmica (Area del vivero MIR-3) en la clasificación americana (USDA, 2006) y Humic Acrisols (MIR-1), Ferralic Cambisols (MIR-2) y Haplic Acrisols (MIR-3) en la clasificación de la FAO (1994) respectivamente; de acuerdo a Holdrige se corresponde a la zona de vida de Bosque Húmedo Pre-montano (bhP). El material parental corresponde a esquistos grafitosos-cuarzo muscovíticos de la formación Las Mercedes, con un relieve montañoso escarpado, y excesivamente bien drenado.

### **2.3.2. Diseño experimental**

En este trabajo se compararon las propiedades fisicoquímicas de suelos con dos (2) variedades de café: Caturra y Catuaí, a diferentes contenidos de humedad del suelo, durante un año, haciendo tres (3) muestreos en época seca (enero – mayo) y tres (3) muestreos en época lluviosa (junio – septiembre).

Se utilizó un diseño en ortogonal de dos vías donde se seleccionaron seis (6) sitios de muestreo por cada variedad de café, cada sitio con área de diez metros cuadrados (10 m<sup>2</sup>) ubicados en forma de zig-zag (Fig. 2.2). En cada sitio se conformó una muestra compuesta de seis (6) barrenos seleccionados aleatoriamente para cada muestreo, durante seis (6) veces

en el año 2014, lo cual equivale a 36 muestras para cada variedad, que suman 72 muestras en total .



**Figura 2.2** Distribución de los sitios para el muestreo de suelos.

### 2.3.3. Muestreo de suelos

Se colectaron las muestras a una profundidad de 0 – 5 cm, haciendo un recorrido del área de estudio en forma de zig-zag. Se escogió dicha profundidad de muestreo teniendo en cuenta que en este tipo de agroecosistemas para el cultivo de café, el mantillo de hojarasca y residuos vegetales que se forma en la superficie del suelo afecta directamente los primeros centímetros de suelo. Además, los mayores contenidos de materia orgánica, biomasa microbiana, actividad biológica, y actividades enzimáticas se detectan a nivel superficial (primeros 5 cm), como lo sugieren Bloem et al. (2006) y Madejón et al. (2007) en suelos agrícolas y además hay que considerar que dichos parámetros disminuyen con la profundidad como ha sido descrito por numerosos autores (Deng y Tabatabai, 1996, 1997; Ekenler y Tabatabai, 2003; Gianfreda y Ruggiero, 2006; Contreras et al., 2006).

#### **2.3.4. Análisis de Laboratorio**

A las muestras se les determinó el contenido de agua en el suelo (humedad de campo), como porcentaje de humedad (% Hum), después se tamizaron a través de un tamiz de 2 mm y se dividieron en dos partes. Una fue almacenada en nevera (4 - 6°C) con su humedad de campo, para su posterior análisis microbiológico y bioquímico (Respiración basal, carbono de la biomasa microbiana, deshidrogenasa, hidrólisis del diacetato de fluorisceina, amonificación de arginina, fosfatasa ácida,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa y proteasa) y otra parte se secó al aire para los análisis fisicoquímicos (textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, fósforo total, fósforo asimilable, nitrógeno total, acidez intercambiable, capacidad de intercambio catiónico real, cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na). Las muestras fueron procesadas y analizadas en el Laboratorio de Ecología de Suelos, Centro de Ecología del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Los análisis de capacidad de intercambio catiónico real (CICR), acidez intercambiable (Al+H) y cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na) fueron procesados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Córdoba en Montería – Colombia.

#### **2.3.5. Análisis Estadístico**

Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis exploratorio con el test de Kolmogorov-Smirnov para verificar el ajuste de los datos a la curva normal y el test de Levene para comprobar la homogeneidad de varianzas (prueba de homoscedasticidad). Si bien la mayoría de los datos se ajustaban a la curva normal no así en la homogeneidad de varianzas por lo cual el análisis clásico de varianza (ANOVA) no podía aplicarse con la rigurosidad del caso. En el ANEXO 1 se resumen las interpretaciones de ambos tests.

Para obviar estos problemas se decidió aplicar un análisis no paramétrico permutacional de varianza, PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance), de dos vías donde los factores fueron: variedad (dos niveles: Catuaí y Caturra) y

época de muestreo (dos niveles; seca y lluvia) (Anderson, 2001). La rutina PERMANOVA originalmente escrita en lenguaje FORTRAN es una prueba no paramétrica que permite a partir de un  $p$ -valor obtenido en el análisis, establecer la existencia de diferencias estadísticas significativas entre dos o más grupos, en función de una medida de distancia preestablecida por ejemplo distancia euclidiana, Bray-Curtis, etc. El análisis de PERMANOVA permite al igual que el ANOVA paramétrico descomponer (particionar) la variabilidad de acuerdo a una o más variables explicativas o factores; mide o prueba las interacciones entre los factores, permite desarrollar modelos para uso explicativo, discriminatorio o predictivo. La rutina calcula correctamente el estadístico “pseudo-F” a partir de la matriz distancia para cada termino en el modelo, basado en las expectativas de la media de cuadrados, de manera que es directamente análoga a la construcción del estadístico F para los modelos ANOVA multifactoriales. El valor de  $p$  se obtiene usando un procedimiento de permutación apropiado para cada termino (Anderson, 2001; Anderson y ter Braak, 2003). También se aplicó el PERMDISP (Permutational Analysis of Multivariate Dispersions), el cual es un test de homogeneidad de dispersión multivariado dentro de un grupo sobre la base de cualquier medida de similitud. Esta aplicación ayuda a interpretar los resultados del análisis PERMANOVA, de este modo hace la suposición implícita de que la dispersión es aproximadamente constante entre los grupos; es análogo al test de Levene de homogeneidad de varianzas (Anderson, 2006; Anderson et al., 2008).

Los efectos de las variedades, la estacionalidad y la interacción sobre COT, NT, fósforo asimilable (Pasim), fósforo total (PT), DA, arena, limo, arcilla, pH, CE, CIC real (CICR), acidez intercambiable (AI+H), cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na) fueron analizados mediante PERMANOVA de dos (2) vías, para las variables, previa comprobación del supuesto de homocedasticidad de dispersión multivariada mediante PERMDISP (Anderson et al., 2008). Para todos los análisis, los datos fueron previamente normalizados y se calcularon matrices de distancias euclidianas. Se utilizó el programa PRIMER 6. Versión 6.1.13 & PERMANOVA + 1.0.3, para la realización de estos análisis.

En la normalización de los datos, el programa citado, sustrae la media a cada uno de los datos de cada variable y los divide por la desviación estándar para esa variable,

obteniendo después de la transformación: media = 0 y desviación estándar = 1. La normalización es necesaria cuando se trabaja con matrices en las cuales las variables evaluadas difieren en sus escalas de medidas y por lo tanto no se pueden comparar como datos crudos, lo cual se resuelve con la normalización de sus datos.

### 2.3.6. Propiedades Físicoquímicas

El análisis de laboratorio para los parámetros físicoquímicos se realizó por medio de métodos estandarizados, (Tabla 2.3).

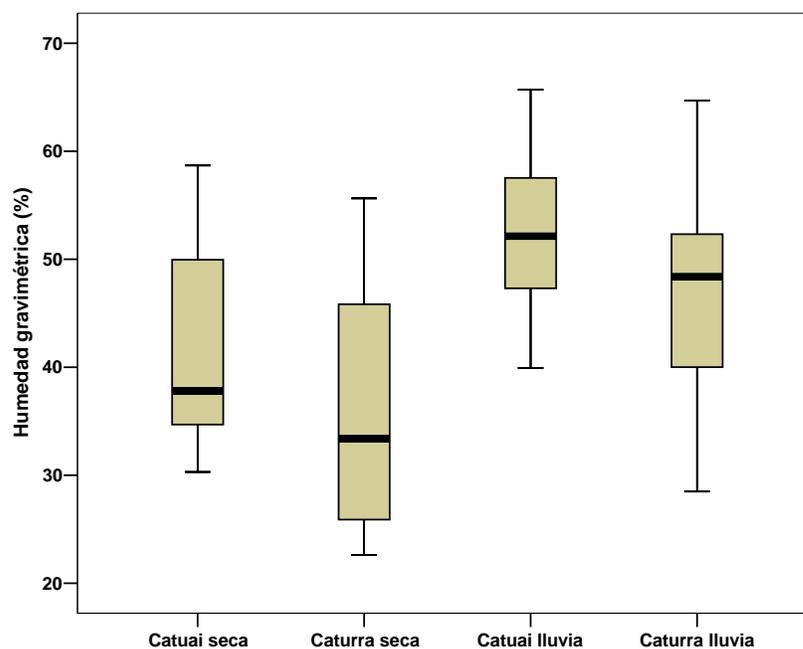
**Tabla 2.3** Parámetros Físicoquímicos.

VARIABLE	MÉTODO	REFERENCIA
pH	Método potenciométrico, utilizando un electrodo de vidrio en una relación suelo: agua 1:2,5.	Gilabert de Brito et al. (2015)
Conductividad Eléctrica	Método conductimétrico, utilizando un conductímetro en una relación suelo: agua 1:2,5.	Gilabert de Brito et al. (2015)
Carbono Orgánico Total (COT)	Oxidación húmeda con ácido sulfúrico concentrado-dicromato de potasio y posterior determinación del Cr (III) por espectrofotometría.	Anderson e Ingram (1993); Sims y Haby (1971)
Nitrógeno Total (NT)	Método de microKjeldahl, digestión ácida (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), destilación por arrastre con vapor y titulación.	Bremner (1996) y Jackson (1962)
Fósforo Total (PT)	Previa digestión ácida (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HClO <sub>4</sub> ) de la muestra de suelo y luego determinado por colorimetría.	Murphy y Rilley (1962)
Fósforo asimilable	Extracción en una solución de bicarbonato de sodio y determinado por espectrofotometría.	Olsen et al. (1954) Murphy y Rilley (1962)
CIC R.	Acetato de amonio 1,0 N; pH: 7,0; se desplaza el NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> con NaCl al 10% + formaldehído y posterior titulación con NaOH 0,2 N	IGAC (2006)
Al + H	Extracción con KCl 1,0 N y titulación	IGAC (2006)
Ca y Mg	Acetato de amonio 1,0 N; pH: 7,0/ Espectrofotometría absorción atómica	IGAC (2006)
K y Na	Acetato de amonio 1,0 N; pH: 7,0/ Espectrofotometría emisión atómica	IGAC (2006)
% Humedad (%Hum)	Gravimetría, pérdida de agua en estufa a 105 °C	
% arena, limo y arcilla	Sedimentación (Bouyoucos), a través del hidrómetro.	Gilabert de Brito et al. (2015)
Clase Textural	Diagrama ternario de USDA	Gilabert de Brito et al. (2015)
Densidad (DA)	Aparente Método de cilindro Uhland.	Gilabert de Brito et al. (2015)

## 2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.4.1. Porcentaje de humedad del suelo (%Hum)

El PERMANOVA y PERMDISP, para los datos del % Hum (Tabla 2.4 y Fig. 2.3), muestra interacción significativa ( $p < 0,05$ ), indicando que la combinación de diversos factores influye en la respuesta. Se observa diferencias significativas ( $p < 0,001$ ) entre las épocas climáticas muestreadas, con los porcentajes (%) más altos en la época lluviosa, no se observa dispersión en la estacionalidad, lo cual nos permite asumir que la variación es intrínseca de las épocas climáticas (Tabla 2.4).



**Figura 2.3** Fluctuación estacional del % Hum para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

También varía significativamente ( $p < 0,01$ ) entre las variedades, observándose los mayores % Hum en suelos con la variedad Catuai. Debido a que la dispersión multivariada no es significativa, podemos asumir que la variación en el % Hum responde al tipo de variedad y es independiente de las variaciones por estacionalidad. Las diferencias por

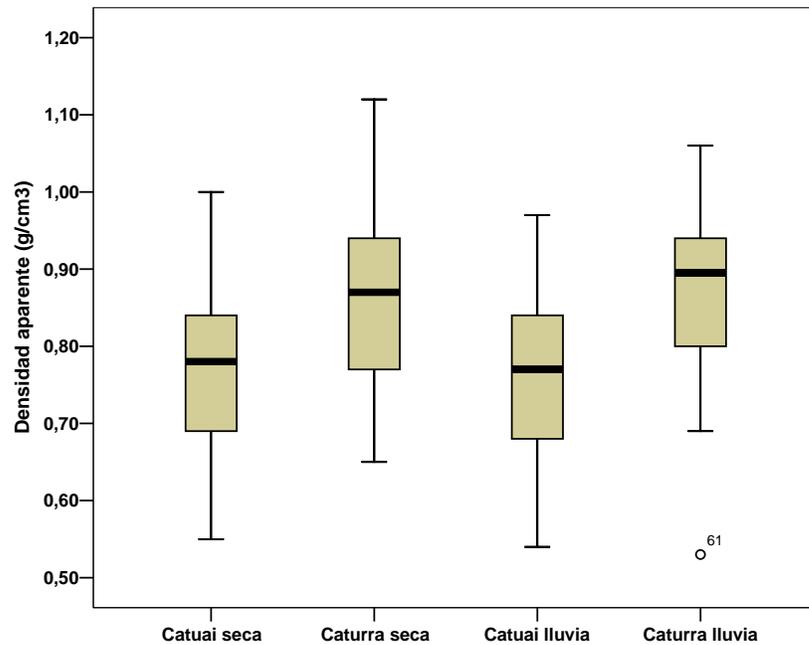
estacionalidad son lógicas y responden a la cantidad de lluvias que caen en cada período. Los mayores % Hum en los suelos con la variedad Catuaí, posiblemente se deben a los mayores contenidos de COT en estos suelos respecto a los suelos con la variedad Caturra. Mayores niveles de MOS favorece propiedades físicas del suelo, como estructura, porosidad, DA, aireación, y el movimiento – retención – disponibilidad de agua en el suelo (Schoenholtz et al., 2000; Leão et al., 2004; Cardona y Sadeghian, 2005). Mayores valores del porcentaje de humedad se encontraron en suelos cafetaleros de la zona cafetera de Colombia, a diferentes profundidades bajo sombra comparados con suelos cafetaleros a libre exposición solar (Cardona y Sadeghian, 2005).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el %Hum correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con DAF ( $r = 0,33$ ); Ptsa ( $r = 0,46$ ); PT ( $r = 0,36$ ); CICR ( $r = 0,43$ ); Mg ( $r = 0,48$ ); K ( $r = 0,31$ ); e inversamente con DH ( $r = -0,55$ ); ureasa ( $r = -0,49$ ); Rbas ( $r = -0,25$ ) y  $qCO_2C$  ( $r = -0,34$ ).

#### **2.4.2. Densidad Aparente (DA)**

En la Tabla 2.4 y Fig. 2.4 vemos que la DA varía significativamente ( $p < 0,01$ ) entre las variedades. Los menores valores se obtuvieron en los suelos con la variedad Catuaí. La dispersión multivariada no es significativa, por ende, la variación responde a diferencias en los suelos relacionados con la variedad (Tabla 2.4). Estos valores de DA, más bajos en los suelos con la variedad Catuaí, probablemente se deben a los mayores valores de COT en estos suelos. Bajos valores de DA, son sinónimos de buena porosidad, adecuado intercambio gaseoso, infiltración de agua, los cuales permiten excelente desarrollo radicular y favorecen adecuado establecimiento y desarrollo de la biota del suelo, esto aplica para ambos suelos, teniendo en cuenta que sus valores de DA ( $0,75 \text{ g/cm}^3$  para Catuaí y  $0,87 \text{ g/cm}^3$  en Caturra) son bajos y propios de suelos con altos contenidos de materia orgánica. En suelos de la zona cafetera de Colombia, con cafetales a la sombra muestreados a diferentes profundidades entre 0 y 40 cm, se encontraron menores valores de densidad aparente que en suelos bajo cafetales a libre exposición solar (Cardona y Sadeghian, 2005).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que la DA correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con pH ( $r = 0,387$ ); e inversamente con la capacidad de intercambio catiónico real (CICR) ( $r = -0,329$ ); NT ( $r = -0,333$ ); MOS ( $r = -0,384$ ). Estos resultados nos muestran como la disminución de la DA favorece la capacidad de intercambio catiónico real (CICR) del suelo, de la misma manera que el aumento de la MOS y del Ntotal (NT) favorece la reducción en los valores de DA.



**Figura 2.4** Fluctuación estacional de la DA para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers)

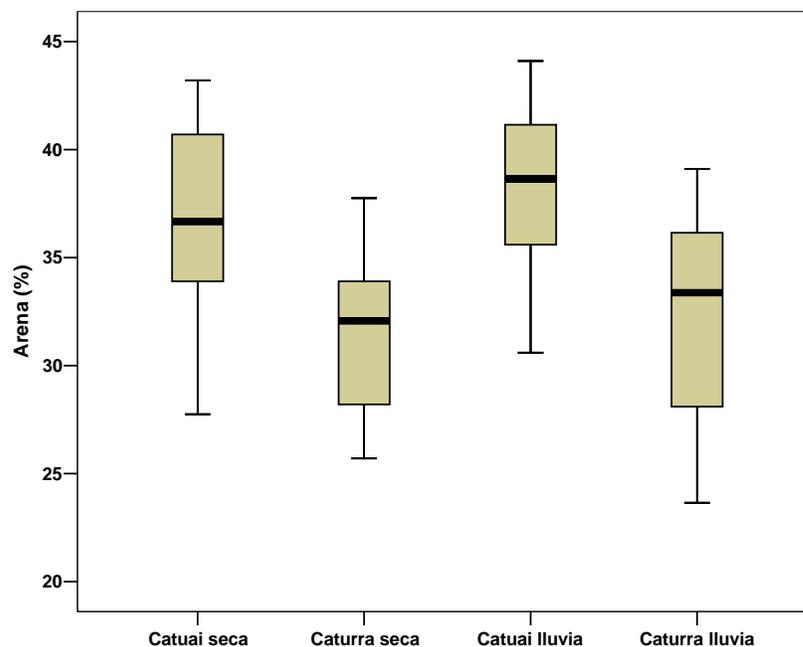
**Tabla 2.4** Media  $\pm$  error estándar para las propiedades físicas del suelo y nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (Pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías.

Variable	Catuaí		Caturra		Variedad		Época climática		Interacción
	Seca	lluvia	seca	lluvia	Pman	Permd	Pman	Permd	Pman
%Hum	41,9 $\pm$ 2,1	51,9 $\pm$ 1,7	36,7 $\pm$ 2,6	47,3 $\pm$ 2,2	*	ns	***	ns	*
DA	0,75 $\pm$ 0,05	0,75 $\pm$ 0,03	0,87 $\pm$ 0,03	0,87 $\pm$ 0,03	**	ns	ns	ns	ns
% Arena	36,6	38,1	31,7	32,4	***	ns	ns	ns	ns
% Limo	33,7	34,6	37,6	39,3	***	***	ns	ns	ns
% Arcilla	30,7	27,4	29,7	28,3	ns	ns	*	ns	ns

Humedad gravimétrica (%); DA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); Arena (%); Limo (%); Arcilla (%); (\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; ns = no significativo al 95%).

### 2.4.3. Porcentaje de arena (%arena)

Varía significativamente  $p < 0,001$  entre variedades (Tabla 2.4 y Fig. 2.5), El PERMDISP a nivel de variedades muestra que la dispersión multivariada no es significativa, por lo tanto se puede considerar que la variación es influenciada por el tipo de variedad. Los mayores valores se encuentran en los suelos con la variedad Catuaí (36,6% en la época lluviosa y 38,1% en la época seca) mientras que para los suelos con la variedad Caturra los valores hallados fueron 31,7 y 32,4% para las épocas de lluvia y seca respectivamente. Aunque el análisis PERMANOVA muestra diferencias significativas por variedades, los valores de los porcentajes encontrados, al llevarlos al triangulo textural se ubicaran en puntos muy cercanos entre sí, por lo cual la clase textural no varía (Fig. 2.8). Resultados que posiblemente están relacionados con la aleatoriedad de la toma de muestras en cada uno de los seis (6) muestreos de suelos realizados durante el experimento.



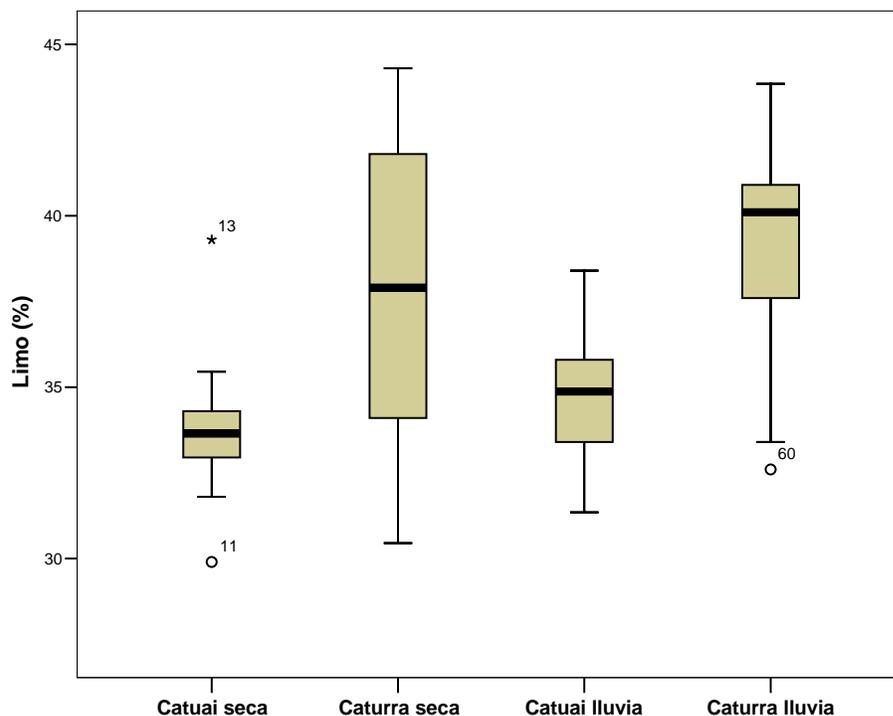
**Figura 2.5.** Fluctuación estacional del contenido de arena para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el % arena correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con MOS ( $r = 0,475$ ); NT ( $r = 0,445$ ); PT ( $r = 0,338$ ); CICR ( $r = 0,390$ ) e inversamente con % arcilla ( $r = -0,688$ ); % limo ( $r = -0,524$ ).

#### 2.4.4. Porcentaje de limo (% limo)

Varía significativamente ( $p < 0,001$ ) entre variedades (Tabla 2.4 y Fig. 2.6), El PERMDISP a nivel de variedades muestra que la dispersión multivariada es significativa ( $p < 0,001$ ), por lo tanto se puede considerar que la variación es influenciada por diversos factores. Los mayores valores se encuentran en los suelos con la variedad Caturra (37,6 % en la época lluviosa y 39,3 % en la época seca) mientras que para los suelos con la variedad Catuaí los valores hallados fueron 33,7 % para lluvia y 34,6 en la época seca. Aunque el análisis PERMANOVA muestra diferencias significativas por variedades, los valores de los

porcentajes encontrados, al llevarlos al triángulo textural se ubican en puntos muy cercanos entre sí, por lo cual la clase textural no varía (Fig. 2.8).



**Figura 2.6.** Fluctuación estacional del contenido de limo para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Puntos fuera de las cajas o círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers)

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el % limo correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con el pH ( $r = 0,465$ ); la A.A ( $r = 0,439$ );  $\beta$ Glu ( $r = 0,416$ ); DH ( $r = 0,379$ ); Ca ( $r = 0,364$ ); CE ( $r = 0,316$ ) e inversamente con el % arena ( $r = -0,524$ ); Al+H ( $r = -0,522$ ); CICR ( $r = -0,351$ ); NT ( $r = -0,333$ ); MOS ( $r = -0,313$ ); PT ( $r = -0,509$ ); Pasim ( $r = -0,463$ ). Estos resultados nos muestran la importancia del % limo para estos suelos, al correlacionar tanto positiva como negativamente con varios parámetros bioquímicos y fisicoquímicos.

#### **2.4.5. Porcentaje de arcillas (% arcillas)**

El análisis PERMANOVA muestra diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) por época climática (Tabla 2,4; fig. 2,7), los mayores porcentajes se encontraron en la época lluviosa, sin embargo al llevar estos porcentajes al triángulo textural, igual que ocurre con los porcentajes de arena y limo, se ubican en puntos muy cercanos del triángulo (Fig. 2.8).

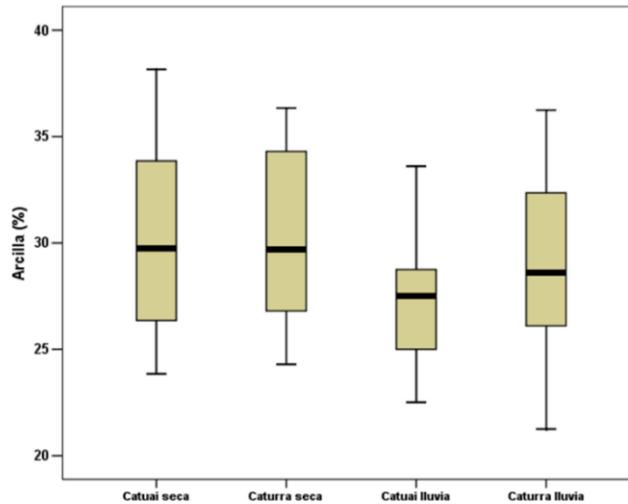
El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el % arcillas correlacionó significativa e inversamente con el Ca ( $r = -0,511$ ); Mg ( $r = -0,411$ ) y con el % arena ( $r = -0,688$ ). En resumen, los pequeños cambios encontrados en los porcentajes de arena, limo y arcilla posiblemente se deben a la variabilidad ocasionada por la aleatoriedad en la toma de cada muestreo de suelo durante el experimento.

#### **2.4.6. Clase textural**

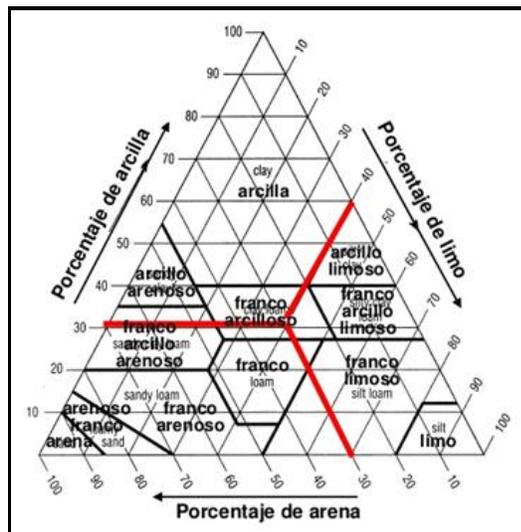
El análisis granulométrico permitió clasificar los suelos para ambas variedades y épocas climáticas de muestreo, como franco arcillosos (Fig. 2.8). Al observar la ubicación de los diferentes porcentajes de las partículas en el triángulo textural, vemos que se ubican muy cerca o sobre la línea que separa suelos francos de los franco-arcillosos.

Un suelo de textura franca es considerado por muchos como la mejor textura y los mejores suelos para la mayoría de los cultivos. Estos suelos combinan “proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla”, si observamos el triángulo textural (Fig. 2.8) vemos que los suelos francos combinan proporciones de arena entre aproximadamente 30 y 50%; igualmente entre 30 y 50% de limo y entre 10 y 25% de arcillas, esta mezcla de arenas, limos y arcillas permite una porosidad adecuada para el buen desarrollo radicular, buena infiltración de agua y a la vez buena retención de agua y nutrientes, así como adecuada aireación. Los suelos de nuestro estudio sólo difieren de los suelos francos en su mayor contenido de arcillas, sin embargo se ubican muy cerca de la línea que los separa de los suelos francos, por lo cual se puede considerar que sus características fisicoquímicas son muy parecidas a las de

los suelos francos, además por su alto contenido de materia orgánica presentaran la tendencia a comportarse como suelos arcillosos pero conservando buena porosidad y capacidad de infiltración de agua propias de suelos francos.



**Figura 2.7.** Fluctuación estacional del contenido de arcillas para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

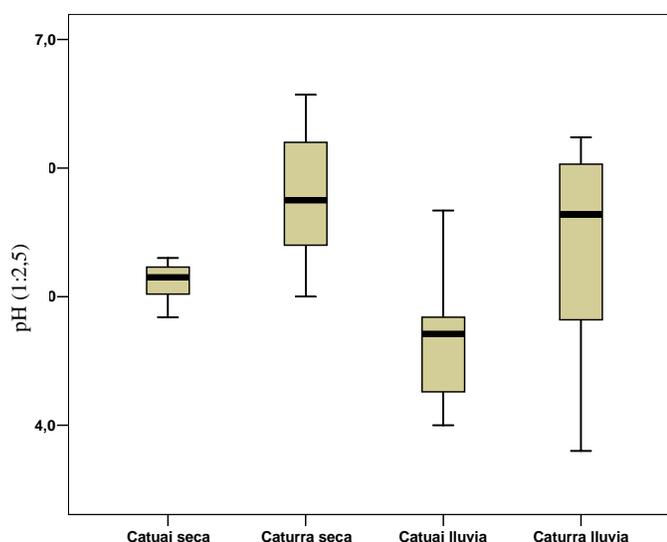


**Figura 2.8.** Clase textural para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

#### 2.4.7. pH

Varía significativamente  $p < 0,001$  tanto entre las variedades como en la estacionalidad, los valores más bajos de pH aparecen en los suelos con la variedad Catuaí y en ambos suelos son más bajos en época lluviosa que en época seca (Tabla 2.5 y Fig. 2.9). El PERMDISP a nivel de variedades muestra que la dispersión multivariada no es significativa, por lo tanto se puede considerar que la variación es influenciada por el tipo de variedad. Por otra parte, el PERMDISP para la estacionalidad indica que la dispersión multivariada es significativa, por ende es posible que la variación del pH en la estacionalidad este influenciada por diversos factores. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Dilly y Munch, (1996), quienes encontraron disminución y menores valores de pH en sitios húmedos comparados con sitios secos, en estudios de descomposición de hojarasca de aliso negro. En suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, Murillo (2007) y Uzcategui (2009) observaron variaciones del pH de 4,4 a 5,4 y de 4,0 a 5,2 respectivamente. Sin embargo Uzcategui (2009) no encontró diferencias significativas por estacionalidad. Además reporta que los suelos con mayor acidez fueron fertilizados orgánicamente con compost más hojarasca, mientras aquellos con pH más altos fueron abonados con fertilizante químico fosfatado. Mientras que en suelos cafetaleros del estado Trujillo, en la subcuenca del río Castán, Arellano, (2000) halló valores de pH que variaron de 4,5 en café bajo sombra a 5,1 en café sin sombra, respectivamente, a una profundidad entre 0 y 25 cm, y en la subcuenca del Río Monaicito González y Gudiño, (2007) reportaron variaciones del pH entre 4,25 y 4,55 en tres fincas cafetaleras. Por otra parte en el estado Lara, en suelos cafetaleros de la cuenca alta del río Yacambú; valores de pH entre 3,6 y 5,0 fueron hallados por Suárez, (2005). En esta investigación, los valores de pH variaron entre 4,6 a 5,8; valores que están en el rango de valores encontrados en los diferentes estudios para diferentes zonas cafetaleras de Venezuela como se ha discutido e igualmente coinciden con los valores hallados por Porras, (2006) quien en suelos cafetaleros del corredor biológico de Turrialba en Costa Rica, donde se han estudiado suelos tipo andisoles, inceptisoles y ultisoles, en muestras tomadas a profundidad de 0 a 20 cm reportó valores de pH entre 4,77 a 5,28. Este investigador además sugiere que el cultivo de café requiere de un pH óptimo entre 5,0 a 5,5. Se ha considerado que valores de pH  $< 5$  corresponden a suelos con pH fuertemente ácido (Casanova, 1991). La

mejor calidad de café se ha producido en bosques naturales de café con valores de pH entre 5,3 y 7 (Pohl et al. 2014). Los menores valores de pH encontrados en la época lluviosa para nuestra investigación puede estar relacionada con mayor velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo favorecida por el mayor contenido de agua, produciendo mayor concentración de ácidos orgánicos y  $H^+$  por las transformaciones de N orgánico a  $NO_2^-$  ( $2NH_4^+ + 3O_2 \longrightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$ ). Mientras que las diferencias por variedad posiblemente estén relacionadas con mayor contenido de materia orgánica en los suelos con la variedad Catuaí, como también es probable que se deba a la aplicación de cal agrícola en los suelos con la variedad Caturra al momento de la siembra (información personal suministrada por la administración del cultivo).



**Figura 2.9** Fluctuación estacional del pH para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el pH correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con el Ca ( $r = 0,402$ ); DA ( $r = 0,387$ ); % limo ( $r = 0,465$ ); ureasa ( $r = 0,420$ ); A.A ( $r = 0,513$ ) e inversamente con CICR ( $r = -0,517$ ); DAF ( $r = -0,512$ ); Al+H ( $r = -0,682$ ); K ( $r = -0,303$ ). Estos resultados nos muestran la gran

importancia del pH para estos suelos al correlacionar con varios de los parámetros fisicoquímicos y bioquímicos estudiados.

**Tabla 2.5** Media  $\pm$  error estándar para las propiedades químicas de los suelos y nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías.

Variable	Catuaí		Caturra		Variedad		Época climática		Interacción
	Seca	lluvia	seca	lluvia	Pman	Permd	Pman	Permd	Pman
pH	5,1 $\pm$ 0,0	4,6 $\pm$ 0,1	5,8 $\pm$ 0,1	5,4 $\pm$ 0,2	***	ns	***	*	ns
CE	188 $\pm$ 6	277 $\pm$ 13	241 $\pm$ 12	293 $\pm$ 27	*	ns	***	ns	ns
CICR	32,5 $\pm$ 0,9	45,4 $\pm$ 1,7	27,2 $\pm$ 2,1	30,3 $\pm$ 1,9	***	ns	***	**	**
COT	58,7 $\pm$ 1,9	58,3 $\pm$ 2,5	44,3 $\pm$ 2	42,09 $\pm$ 2	***	ns	ns	ns	ns
NT	6,0 $\pm$ 0,1	5,8 $\pm$ 0,2	5,0 $\pm$ 0,2	5,3 $\pm$ 0,2	***	ns	ns	ns	ns
PT	1080 $\pm$ 73	980 $\pm$ 36	803 $\pm$ 64	733 $\pm$ 44	***	ns	ns	*	ns
P asim	69,8 $\pm$ 11,6	50 $\pm$ 5,2	31,7 $\pm$ 4,7	23 $\pm$ 2,9	***	**	*	ns	ns
Ca	13,8 $\pm$ 0,6	13,7 $\pm$ 0,7	14,4 $\pm$ 0,9	13,4 $\pm$ 0,9	ns	ns	ns	ns	ns
Mg	2,6 $\pm$ 0,07	4,4 $\pm$ 0,14	2,5 $\pm$ 0,09	4,0 $\pm$ 0,15	*	ns	***	**	ns
K	0,33 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,05	0,33 $\pm$ 0,03	0,34 $\pm$ 0,02	**	*	**	**	**
Na	0,09 $\pm$ 0,0	0,11 $\pm$ 0,02	0,08 $\pm$ 0,0	0,08 $\pm$ 0,0	***	**	ns	ns	ns
Al + H	0,53 $\pm$ 0,05	0,41 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,05	0,27 $\pm$ 0,11	***	ns	ns	ns	*

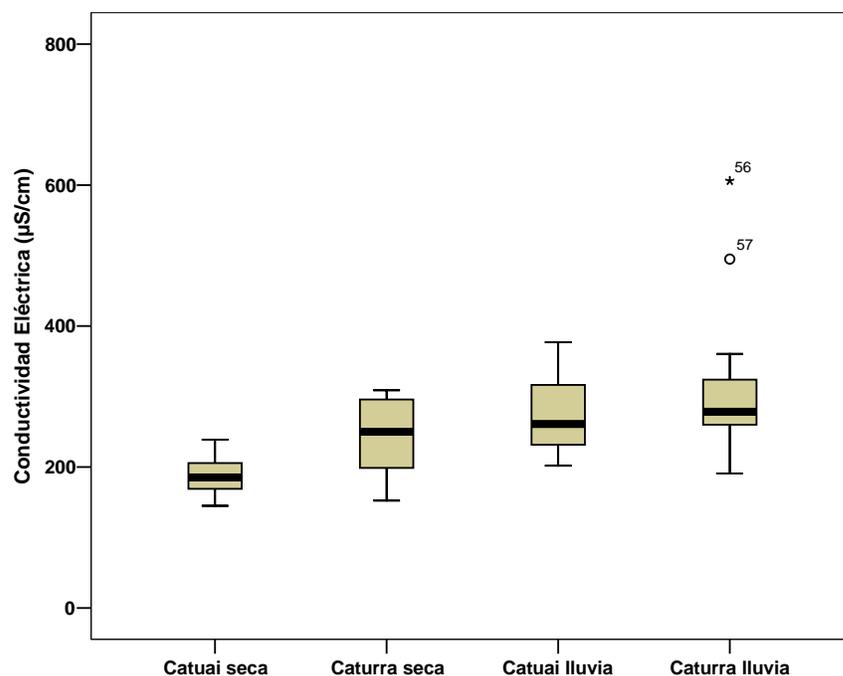
CE ( $\mu$ S/cm); CICR (cmol<sup>+</sup>/kg); COT (gC/kg); NT (gN/kg); PT (mg P/kg); Pasim (mg P/kg); Ca (cmol<sup>+</sup>/kg); Mg (cmol<sup>+</sup>/kg); K (cmol<sup>+</sup>/kg); Na (cmol<sup>+</sup>/kg); Al+H (cmol<sup>+</sup>/kg); (\* p<0,05; \*\* p<0,01; \*\*\* p<0,001; ns = no significativo al 95%).

#### 2.4.8. Conductividad eléctrica (CE)

Los valores promedio para la CE, variaron entre 188  $\pm$  6  $\mu$ S/cm en suelos con la variedad Catuaí estación seca y 293  $\pm$  27  $\mu$ S/cm en suelos con la variedad Caturra estación lluviosa (Tabla 2.5 y Fig. 2.10), valores que están dentro del rango normal de suelos no salinos Donahue et al. (1981). En el análisis PERMANOVA (Tabla 2.5) podemos observar que esta variable del suelo, varía significativamente  $p<0,05$  entre variedades y con la estacionalidad  $p<0,001$ , pero desde el punto de vista agronómico la variación no es importante.

Estos valores de CE están dentro del rango de valores hallados también en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, por Murillo, (2007) quien encontró valores de CE entre 280 a 560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Uzcategui, (2009) reportó variaciones desde 224 a 373  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Igualmente dentro de las variaciones encontradas por González y Gudiño (2007) quienes hallaron valores entre 170 a 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en suelos cafetaleros del estado Trujillo y dentro de los reportados por Suárez (2005) quien en el estado Lara encontró valores entre 150 a 1450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; mientras que Durango et al. (2015) en suelos tipo ultisoles con características andicas en Turrialba, Costa Rica, a profundidad entre 0 y 10 cm hallaron valores de 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en suelos con café; 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en sistemas café – banano y 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en bosque, valores mayores a los encontrados en nuestro estudio.

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que la CE correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con Mg ( $r = 0,549$ ); K ( $r = 0,390$ ); CICR ( $r = 0,476$ ); % limo ( $r = 0,316$ ) e inversamente con ureasa ( $r = -0,312$ ).



**Figura 2.10.** Fluctuación estacional de la Conductividad Eléctrica para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Puntos fuera de las cajas o círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers)

#### 2.4.9. Carbono orgánico total (COT)

El análisis PERMANOVA para los valores del COT muestra diferencias significativas  $p < 0,01$  entre las variedades, con los mayores valores en los suelos con la variedad Catuaí tanto en la época seca como en la época lluviosa (Fig. 2.11). La dispersión multivariada no es significativa, por lo tanto la variación en el COT responde al tipo de variedad (Tabla 2.5). Este comportamiento posiblemente se debe a que las plantas de esta variedad presentan mayor crecimiento vegetativo y mayor edad de establecimiento (aproximadamente 20 años) con respecto a la variedad Caturra, cuyas plantas son más pequeñas. Este menor tamaño de plantas en la variedad Caturra permite establecer mayor densidad de siembra, sin embargo el cultivo con la variedad Caturra fue establecido hace aproximadamente 8 años, lo que evidencia mayor perturbación en los suelos cultivados con la variedad Caturra. Por estas razones es posible que se haya producido mayor aporte de residuos vegetales reflejándose en mayores valores del COT en los suelos con la variedad Catuaí. La materia orgánica del suelo es la principal fuente de nitrógeno del suelo (Sadeghian y González, 2012). No se encontró diferencias significativas por la época climática.

En suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos por una parte Murillo, (2007) halló valores que variaron entre 30 y 39 gC/kg; mientras Uzcategui, (2009) encontró variaciones entre 48 gC/kg en el período de lluvias a 44 gC/kg en período seco. Por otra parte en suelos cafetaleros del estado Trujillo, Arellano, (2000) reportó valores entre 20 y 51 gC/kg mientras que Paolini y Arellano, (2004) observaron valores entre 25 y 32 gC/kg en la región de Vitú.

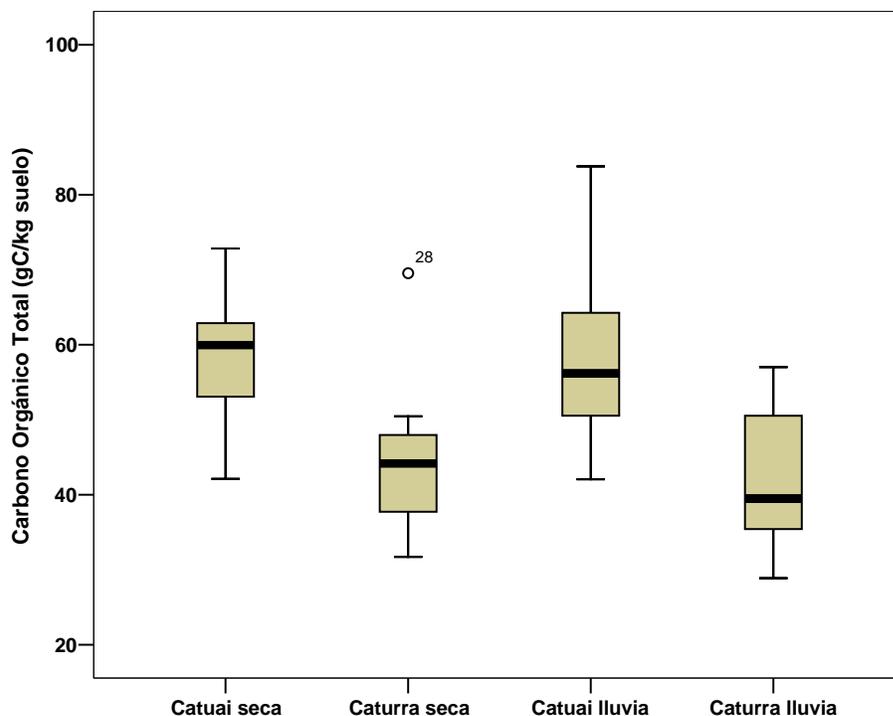
Mogollón y Tremont, (2004) en suelos cafetaleros del estado Falcón observaron variaciones desde 35 gC/kg para sistemas café bajo sombra de guamo a 22 gC/kg en sistemas de café intercalado con cítricos. Por su parte Suárez, (2005) en suelos cafetaleros del estado Lara, halló variaciones entre 34 y 45 gC/kg.

Pérez (2002) y Mendonca et al. (2001), en un suelo tipo oxisol de textura arcillosa situado en la zona de Mata mineira, región sudeste de Mina Gerais en Brasil hallaron niveles más altos de COT en sistemas agroforestales con café, a una profundidad de muestreo de 0 a

5 cm; comparado con sistemas de monocultivo, considerando que los mayores contenidos de COT son evidentes después de varios años de manejo agroforestal.

Durango et al. (2015) en la región de Grano de Oro cantón Turrialba en Costa Rica, en muestras colectadas entre 0 y 10 cm de profundidad hallaron mayores valores de COT en suelos de bosque (70 gC/kg) comparado con suelos cafetaleros (57 gC/kg) y suelos con asociación café – banano (39 gC/kg). Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción); encontraron los mayores valores de COT en el sistema biodinámico (45,6 gC/kg), semejantes a los hallados en este estudio y menores valores en el control (21,1 gC/kg), menores a los observados en nuestro estudio. Pabst et al. (2103) en un estudio realizado en el Monte Kilimanjaro en la región noreste de Tanzania, reportaron 18,9 g/kg en plantaciones de café. Estos autores además encontraron pérdidas del 10% del COT debido al cambio en el uso del suelo de pastizales a plantaciones de café, posiblemente por el uso intensivo de plaguicidas en la producción de café y a la remoción de los restos vegetales después de la poda de los arbustos de café.

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el COT correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con caseinasa ( $r = 0,456$ ); Ptsa ( $r = 0,304$ ); NT ( $r = 0,467$ ); Pasim ( $r = 0,356$ ) e inversamente con  $qCO_2C$  ( $r = -0,303$ ) y con  $qMic$  ( $r = -0,678$ ).



**Figura 2.11.** Fluctuación estacional del Carbono Orgánico Total para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

#### 2.4.10. Nitrógeno total (NT)

A partir del análisis PERMANOVA se observa diferencias significativas  $p < 0,001$  entre los suelos por variedad, presentando los mayores valores en los suelos con la variedad Catuaí (Tabla 2.5 y Fig. 2.12). Debido a que la dispersión multivariada (PERMDISP) no es significativa, podemos asumir que la variación en el contenido de NT responde al tipo de variedad. Los mayores valores del NT encontrados en los suelos cultivados con la variedad Catuaí probablemente estén relacionados con los mayores contenidos de COT (Tabla 2.5). La materia orgánica es la principal fuente de nitrógeno en los suelos (Sadeghian y González, 2012; Cardona y Sadeghian, 2005). No se observó diferencias significativas en la estacionalidad.

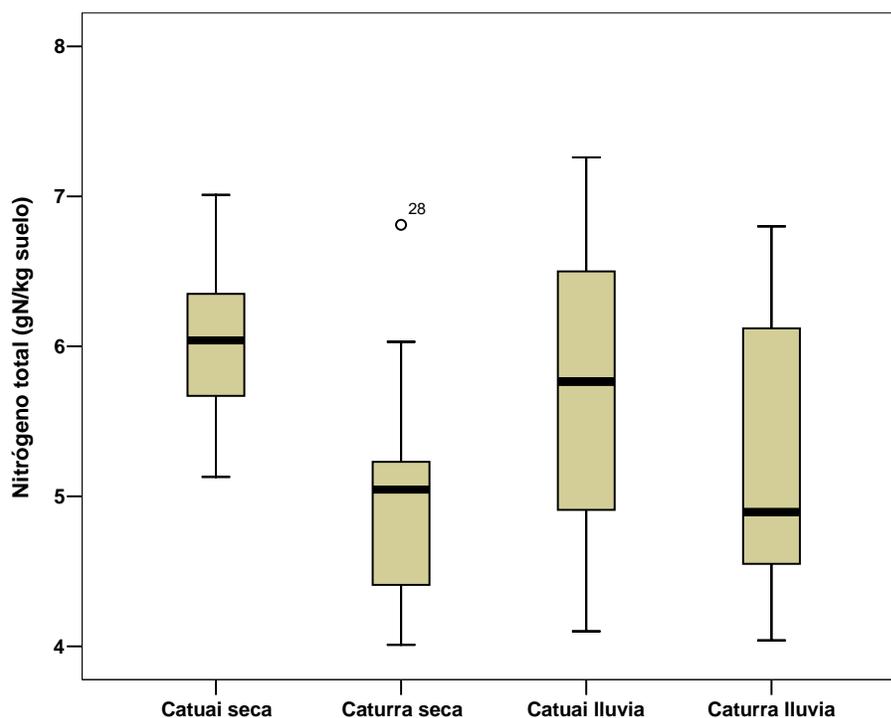
Como se observa en la Tabla 2.5 los valores variaron entre 5 y 6 gN/kg de suelo considerados como muy altos para suelos agrícolas (Rioja, 2002), los cuales son semejantes

a los encontrados por Uzcategui, (2009) quien en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos encontró valores entre 3,9 y 5,8 gN/kg de suelo en el período de lluvia y entre 3,8 y 4,7 gN/kg de suelo para el período seco. También en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, Murillo, (2007) halló valores entre 3,4 y 3,8 gN/kg; semejantes a los reportados por González y Gudiño, (2007) quienes en suelos cafetaleros del estado Trujillo hallaron variaciones entre 2,4 y 3,8 gN/kg suelo y a los encontrados por Zuluaga, (2004) en suelos cafetaleros de Costa Rica reportó variaciones entre 2,6 y 3,4 gN/kg suelo al comparar manejo convencional vs orgánico. Estos últimos tres estudios con valores menores a los observados en nuestra investigación.

Los valores de NT encontrados en este estudio también están dentro del rango de valores hallados por Suárez, (2005) quien el suelos cafetaleros bajo diferentes manejos del estado Lara reportó valores entre 1,9 y 5,6 gN/kg suelo, que a su vez son muy semejantes a los hallados en Costa Rica en sistemas agroforestales por Porras, (2006) quien encontró valores entre 1,9 y 5,1 gN/kg suelo y a los observados por Durango et al. (2015) también en Costa Rica, en la región de Grano de Oro cantón Turrialba, para muestras colectadas entre 0 y 10 cm de profundidad reportaron valores entre 4,6 y 4,3 en suelos con café y café – banano respectivamente. Por otra parte Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción); no encontraron diferencias significativas entre estos suelos. Los valores hallados variaron entre 4,7 y 5,6 gN/kg, valores que están dentro del rango de valores reportados en el presente trabajo.

Pabst et al. (2103) en un estudio realizado en ocho sitios, en ocho diferentes ecosistemas naturales y afectados antropogenicamente, tales como: sabanas, huertos familiares, plantaciones de café, cultivos de maíz, pastizales, bosque montano bajo, bosques de ocotea y bosques de podocarpus en el Monte Kilimanjaro en la región noreste de Tanzania, no observaron diferencias significativas entre estos sistemas estudiados. En las plantaciones de café encontraron valores de 1,85 gN/kg, sensiblemente menores a los observados en nuestro estudio. Estos valores bajos del contenido de nitrógeno posiblemente se debe a que

los bosques de montañas bajas, frecuentemente son deforestados para satisfacer las necesidades de materiales para construcción, leña y tierras de cultivo, posteriormente convertidos a pastizales y finalmente usados para establecer las plantaciones de café.



**Figura 2.12.** Fluctuación estacional del Nitrógeno Total para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

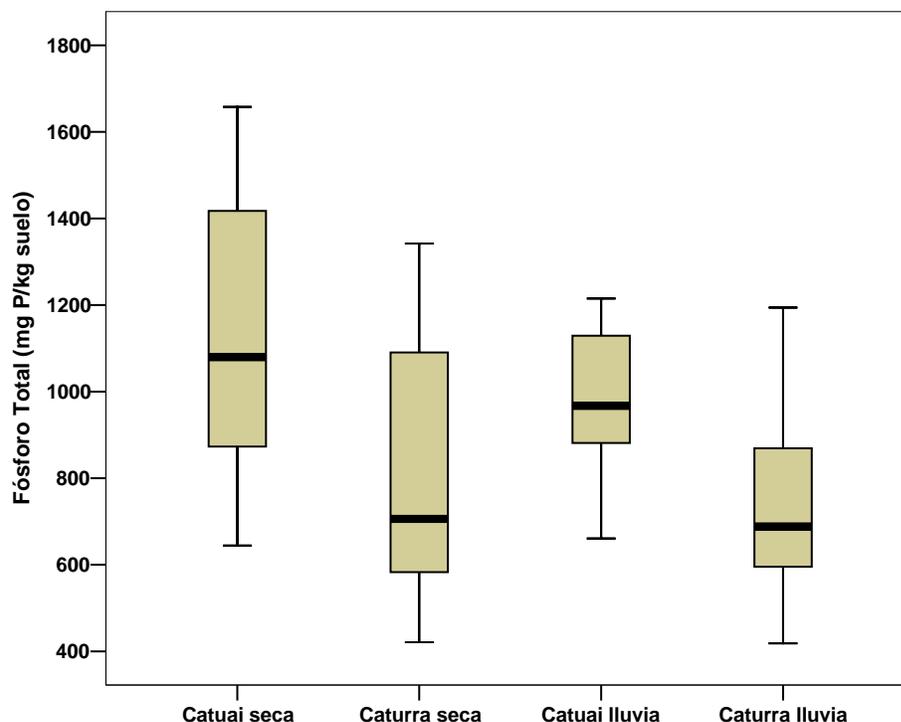
El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el NT correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con Rbas ( $r = 0,388$ ); Ptsa ( $r = 0,418$ ); caseinasa ( $r = 0,312$ ); PT ( $r = 0,519$ ); Pasim ( $r = 0,441$ ); COT ( $r = 0,467$ ); CICR ( $r = 0,460$ ); Ca ( $r = 0,496$ ); Mg ( $r = 0,306$ ); K ( $r = 0,445$ );  $qCO_2$  ( $r = 0,337$ ); %arena ( $r = 0,445$ ); e inversamente con DA ( $r = -0,333$ );  $qMic$  ( $r = -0,311$ ). Estos resultados sugieren la importancia del NT para evaluar la calidad de los suelos estudiados, al correlacionar con varios de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y bioquímicos investigados.

#### 2.4.11. Fosforo total (PT)

El análisis PERMANOVA muestra que el PT varía significativamente  $p < 0,001$  en suelos según la variedad establecida, los mayores valores aparecen en los suelos con la variedad Catuaí, teniendo en cuenta que la dispersión multivariada no es significativa, se acepta que la variación es intrínseca de la variedad. No se observa variación por época de muestreo (Tabla 2.5 y Fig. 2.13).

González y Gudiño, (2007) en suelos cafetaleros del estado Trujillo hallaron valores entre 397 y 681 mgP/kg inferiores a los valores encontrados en nuestro estudio. Mientras que en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, Uzcategui, (2009) observó valores entre 560 y 1065 en período seco y entre 833 y 1.215 mg P/kg, muy semejantes a los valores hallados en el presente estudio. Los mayores valores registrados en la época lluviosa puede ser debido a que por la humedad del suelo se dan reacciones químicas de solubilización de compuestos que contribuyen con mayor aporte de elementos a la fase cambiante y a la fase solución, por lo cual quedan más fácilmente desplazables por cationes de intercambio (Narváez et al., 2014), además los cationes extractables de un suelo húmedo pueden provenir de diferentes fuentes y sólo una parte de ellos corresponde a los llamados intercambiables, o sea provenientes de la doble capa difusa en donde son retenidos por cargas superficiales (García, 2001).

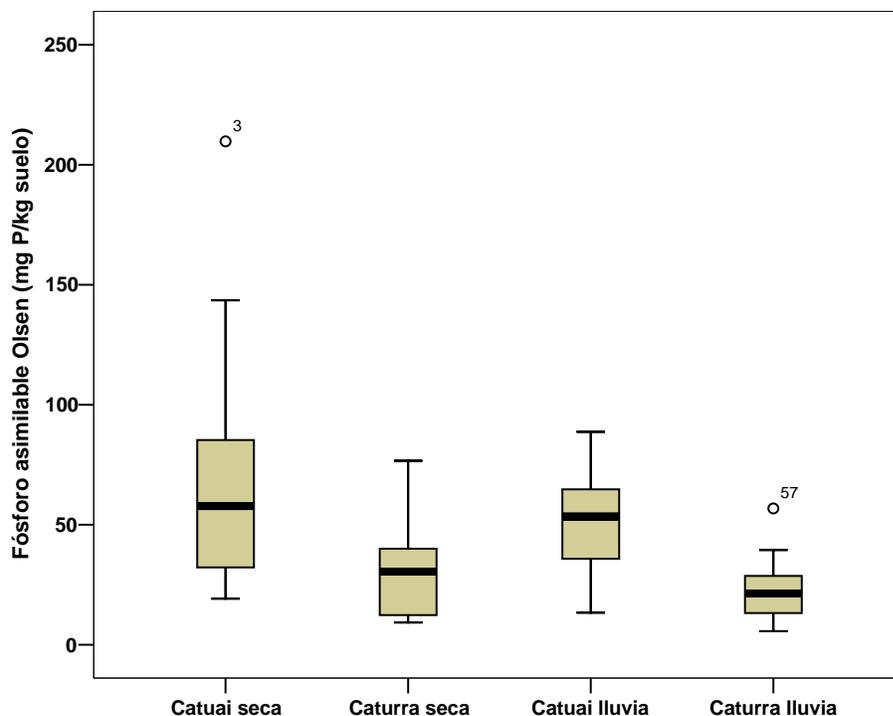
En el análisis de correlación bivariado (ANEXO II), podemos observar que el PT correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con P<sub>tsa</sub> ( $r = 0,555$ ); P<sub>asim</sub> ( $r = 0,766$ ); CICR ( $r = 0,396$ ); NT ( $r = 0,519$ ); MOS ( $r = 0,605$ ); qCO<sub>2</sub> ( $r = 0,338$ ); %Hum ( $r = 0,355$ ); % arena ( $r = 0,338$ ); e inversamente con el qMic ( $r = -0,345$ ); DH ( $r = -0,422$ ); %limo ( $r = -0,509$ ). Los resultados para el análisis de correlación bivariado nos muestran que el PT aumenta con la actividad de la fosfatasa ácida, al igual que aumenta el P<sub>asim</sub>, la MOS, la CICR, el % Hum y la arena, mientras se reduce con el incremento en el % limo.



**Figura 2.13.** Fluctuación estacional del PT para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

#### 2.4.12. Fosforo asimilable (Pasim)

Los resultados del análisis PERMANOVA muestran que el Pasim, varió significativamente  $p < 0,001$  entre los suelos con diferentes variedades, observándose los mayores valores en suelos con la variedad Catuaí. Sin embargo, la dispersión multivariada es significativa  $P < 0,01$ , indicándonos que esta variación no es intrínseca de las variedades, sino que puede estar influenciada por múltiples factores, como el contenido de humedad, carbono orgánico y factores asociados a la variabilidad espacial del suelo (Tabla 2.5 y Fig. 2.14). En estos hallazgos se observó además variación significativa por la época de muestreo, con los mayores valores obtenidos durante la época seca (Tabla 2.5 y Fig. 2.14). El (PERMDISP) para este caso indica una dispersión no significativa, por ende podemos decir que la variación responde al cambio de época climática. Los valores encontrados en el presente estudio variaron entre 23 y 70 mg P/kg, considerados de medios a altos (Cortes y Malagón, 1983).



**Figura 2.14** Fluctuación estacional del Fósforo asimilable (Olsen) para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Uzcategui (2009) en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos observó valores que variaron desde 114 mg P/kg en período de lluvia a 167 mg P/kg en período seco. Mientras que Murillo, (2007) igualmente en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos encontró variaciones entre 210 y 294, en ambos estudios los valores son mayores a los hallados en nuestra investigación posiblemente debido a que dicha finca fue fertilizada constantemente. Por otra parte Suárez, (2005) en suelos cafetaleros del estado Lara reportó valores promedio de 55 mgP/kg, mientras que González y Gudiño, (2007) reportaron variaciones desde 8 a 42 mg P/kg en suelos cafetaleros del estado Trujillo. Valores semejantes a los reportados en nuestros hallazgos.

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el Pasim correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con Ptsa ( $r = 0,534$ ); PT ( $r = 0,766$ ); Rbas ( $r = 0,320$ ); NT ( $r = 0,441$ ); MOS ( $r = 0,546$ ); COT ( $r = 0,356$ );  $qCO_2$  ( $r = 0,437$ ); e inversamente con la DH ( $r = -0,312$ );  $qMic$  ( $r = -0,389$ ); % limo ( $r = -0,463$ ). Estos resultados

nos permiten relacionar que el Pasim aumenta con la actividad de la fosfatasa ácida, con el PT, la MOS, mientras se reduce con el aumento del % limo.

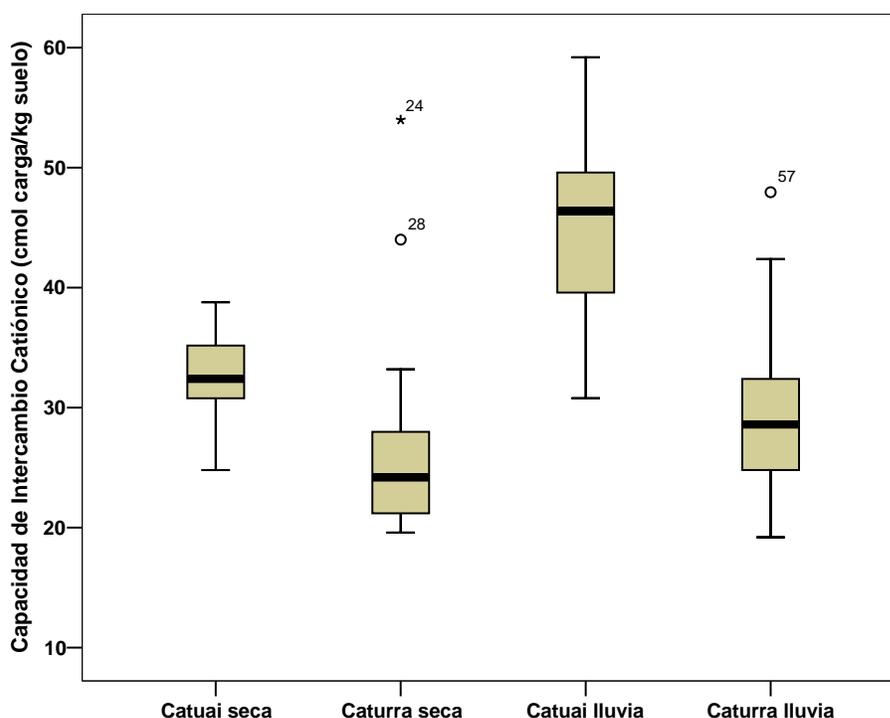
#### **2.4.13. Capacidad de intercambio catiónico real (CICR)**

El análisis PERMANOVA para esta variable mostró interacción significativa ( $p < 0,01$ ), la cual se refleja en que se presentan mayores valores durante la estación lluviosa para los suelos con ambas variedades, sin embargo se observa que en los suelos con la variedad Catuaí los valores son mayores, aún en la estación seca respecto a los suelos con Caturra en la estación lluviosa (Tabla 2.5). Por otra parte, la CICR, varía significativamente  $p < 0,001$  entre variedades y en la época de muestreo (Tabla 2.5 y Fig. 2.15). Teniendo en cuenta que para la variación entre las variedades, el PERMDISP indica una dispersión multivariada no significativa, podemos asumir que la variación en la CICR, responde al tipo de variedad cultivada y los valores fueron mayores en los suelos con la variedad Catuaí en ambas estaciones, siendo más altos los valores en la estación lluviosa. La variación significativa por estacionalidad registró una dispersión multivariada significativa ( $p < 0,01$ ), lo cual nos indica que la variación estacional puede ser debida a diversos parámetros. Los mayores valores encontrados en suelos con la variedad Catuaí, se pueden explicar por sus mayores contenidos de COT, de acuerdo con Donahue et al (1981) quienes reportan que la CIC del humus varía entre 100 – 300  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  suelo. Estos autores relacionan la textura del suelo con la CIC, reportando los siguientes rangos normales: suelos arenosos de 1 a 5  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ; franco arenosos de 5 a 10  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ; francos y franco limosos 5 – 15  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ; franco arcillosos 15 – 30  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  y arcillosos  $>30$   $\text{cmol}^+/\text{kg}$ . Los valores encontrados en este trabajo variaron entre 27 y 45  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ , los cuales se pueden considerar valores altos para suelos agrícolas, propios de suelos franco arcillosos con altos contenidos de COT.

Por otra parte los mayores valores de CICR en suelos con Catuaí estación lluviosa probablemente se deben a una mayor tasa de descomposición de la materia orgánica activa, favorecida por mayor contenido de agua en el suelo. Según Burbano (2001) es bien conocido que los componentes sólidos del suelo, inorgánicos y orgánicos, poseen cargas electrostáticas

en su superficie. Estas superficies son particularmente grandes en las fracciones de arcilla y materia orgánica. El mismo autor considera que la variación en la CIC asociado con la variación en el estado de la materia orgánica del suelo, también es un índice relacionado directamente con la fertilidad del suelo.

Cardona y Sadeghian (2005) reportaron tendencias superiores de la CIC en cafetales bajo sombra de guamo (*Inga sp*), comparados con cafetales a plena exposición solar. Otros investigadores citados por Cardona y Sadeghian (2005) también encontraron mayores valores de CIC en diferentes sistemas agroforestales comparados con sistemas convencionales, atribuyéndolos al mayor porcentaje de materia orgánica.



**Figura 2.15** Fluctuación estacional de la CICR para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers)

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que la CICR correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con Ptsa ( $r = 0,390$ ); DAF ( $r = 0,407$ ); PT ( $r = 0,396$ ); NT ( $r = 0,460$ ); MOS ( $r = 0,546$ ); Mg ( $r = 0,476$ ); K ( $r = 0,551$ ); %Hum ( $0,414$ ); %arena ( $r = 0,390$ ) e inversamente con la ureasa ( $r = -0,390$ ); A.A ( $r = -0,335$ ); pH ( $r = -0,517$ ); DA ( $r = -0,329$ ) y %limo ( $r = -0,351$ ). Como se observa en estos resultados, la

CICR correlacionó significativamente con muchos de los parámetros fisicoquímicos y bioquímicos estudiados, lo cual nos indica la gran importancia de esta propiedad en la evaluación de la calidad de estos suelos.

#### **2.4.14. Cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na)**

##### **2.4.14.1. Calcio (Ca)**

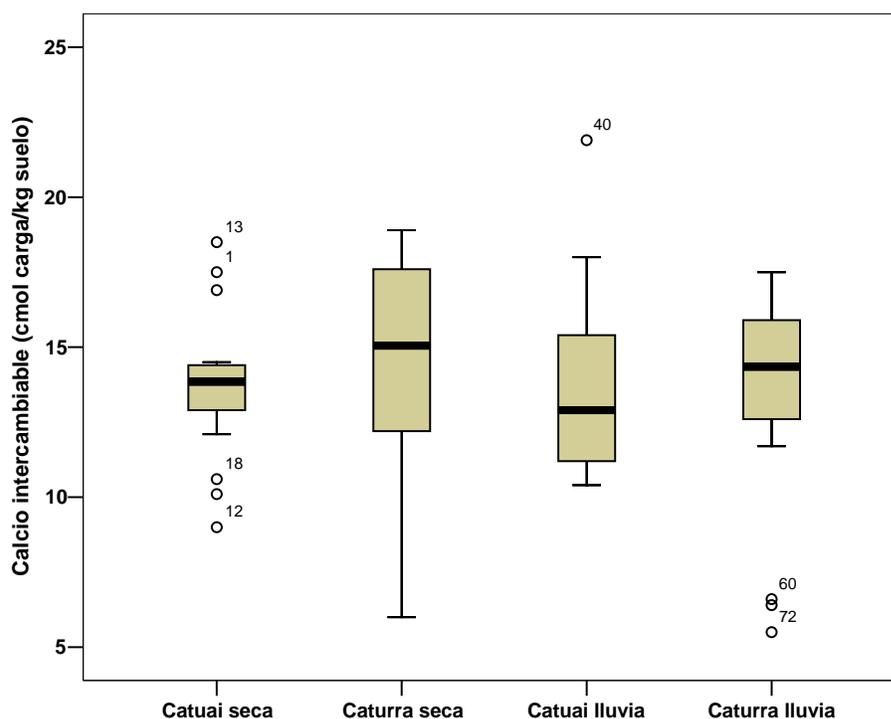
El análisis PERMANOVA no mostró variación para el Ca, a través del estudio (Tabla 2.5 y Fig. 2.16). El valor promedio encontrado fue 13,8 cmol<sup>+</sup>/kg de suelo, considerado como un nivel óptimo para suelos cafetaleros (Martínez, 2013). Otros investigadores hallaron contenidos de calcio adecuados para la mayoría de los suelos con cafetales bajo sombra y a pleno sol, los valores observados variaron entre 0,48 y 10,3 cmol<sup>+</sup>/kg de suelo (Cardona y Sadeghian, 2005), menores a los encontrados en nuestra investigación. Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción); reportaron los mayores valores de Ca en el sistema biodinámico (47 mmol<sup>+</sup>/dm<sup>3</sup>) y menores valores en el control (10 mmol<sup>+</sup>/dm<sup>3</sup>).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el Ca correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con la Ureasa ( $r = 0,313$ ); A.A ( $r = 0,470$ ); casein ( $r = 0,432$ ); NT ( $r = 0,496$ ); MOS ( $r = 0,382$ ) y pH ( $r = 0,402$ ).

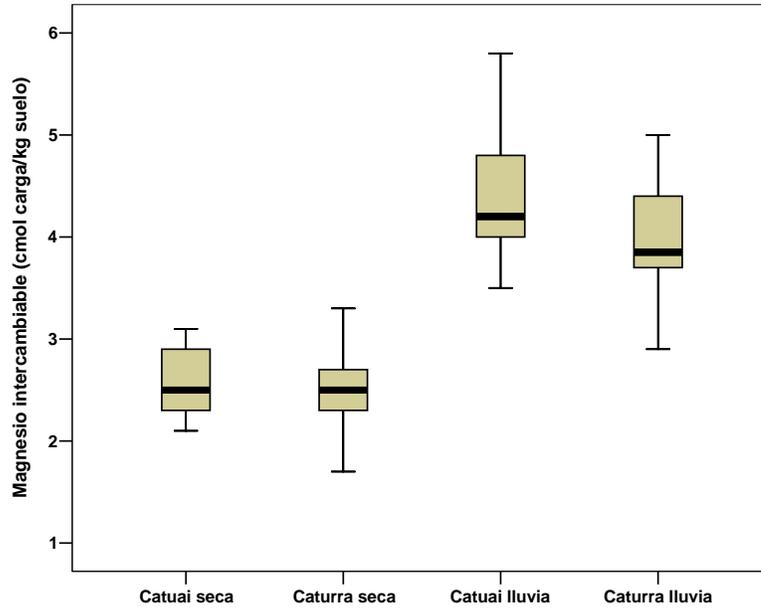
##### **2.4.14.2. Magnesio (Mg)**

Los resultados (Tabla 2.5 y Fig. 2.17) indican diferencias significativas  $p < 0,05$  entre variedades y  $p < 0,001$  por estacionalidad. Los mayores valores resultaron en suelos con la variedad Catuaí y fueron más altos en la estación lluviosa que en la estación seca. Estos hallazgos pueden estar relacionados con el mayor contenido de COT observados en suelos con la variedad Catuaí. Por otra parte los mayores valores registrados en la época lluviosa

puede ser debido a que por la humedad del suelo se dan reacciones químicas de solubilización de compuestos que contribuyen con mayor aporte de elementos a la fase cambiante y a la fase solución, por lo cual quedan más fácilmente desplazables por cationes de intercambio (Narváez et al., 2014), además los cationes extractables de un suelo húmedo pueden provenir de diferentes fuentes y sólo una parte de ellos corresponde a los llamados intercambiables, o sea provenientes de la doble capa difusa en donde son retenidos por cargas superficiales (García, 2001). Los valores variaron entre 2,5  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  en suelos con Caturra estación seca, hasta 4,4  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  en suelos con Catuaí estación lluvia, estos valores se corresponden con el rango de medio a óptimo, para el contenido de magnesio en suelos cafetaleros (Martínez, 2013). Cardona y Sadeghian, 2005 hallaron contenidos de Mg adecuados para la mayoría de los suelos con cafetales bajo sombra y a pleno sol, los valores reportados variaron entre 0,05 y 3,58  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  de suelo, parecidos a los valores más bajos encontrados en nuestra investigación.



**Figura 2.16** Fluctuación estacional del Calcio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel). (Círculos sin relleno corresponden a datos atípicos u outliers)



**Figura 2.17** Fluctuación estacional del Magnesio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción); hallaron los mayores valores de Mg en el sistema biodinámico ( $40 \text{ mmol}^+/\text{dm}^3$ ) y menores valores en el bosque nativo ( $10 \text{ mmol}^+/\text{dm}^3$ ).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el Mg correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con DAF ( $r = 0,464$ ); NT ( $r = 0,306$ ); CE ( $r = 0,549$ ); Ca ( $r = 0,328$ ); CICR ( $r = 0,476$ ); %Hum ( $r = 0,308$ ), e inversamente con ureasa ( $r = -0,667$ ).

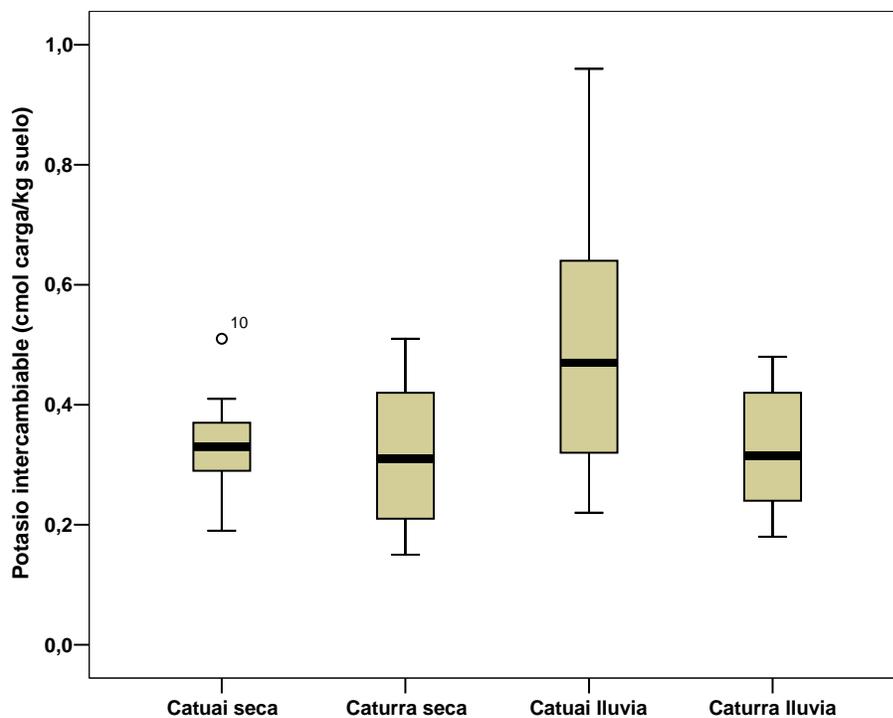
#### 2.4.14.3. Potasio (K)

En los resultados del análisis PERMANOVA se puede observar interacción, lo que nos indica la influencia de diversos factores en las variaciones. Estos resultados además, muestran variación significativa,  $p < 0,01$  tanto entre suelos por variedades como por

estacionalidad (Tabla 2.5 y Fig. 2.18). En ambos casos se presenta dispersión multivariada significativa, corroborando la influencia de diversos factores en las respuestas.

Los valores para el contenido de K en estos suelos varió entre 0,33  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  en la estación seca para ambas variedades hasta 0,52  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  en suelos con la variedad Catuaí estación lluviosa (Tabla 2.5), considerados niveles medios para suelos cafetaleros (Martínez, 2013). Estas diferencias posiblemente se deben a las razones discutidas para el Mg. Cardona y Sadeghian (2005), hallaron menores valores de K en cafetales bajo sombra, comparados con cafetales a plena exposición solar (Valores entre 0,09 y 0,85  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ). Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, encontraron mayores valores de K en suelos bajo sistema agroforestal (1,7  $\text{mmol}^+/\text{dm}^3$ ) y menores valores en el control (1,1  $\text{mmol}^+/\text{dm}^3$ ) al comparar diferentes sistemas para el cultivo de café con el bosque nativo y un control (cultivo de café abandonado por 15 años).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el K correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con Ptsa ( $r = 0,441$ ); DAF ( $r = 0,462$ ); NT ( $r = 0,445$ ); MOS ( $r = 0,550$ ); Mg ( $r = 0,485$ ); CICR ( $r = 0,551$ ); CE ( $r = 0,390$ ); %Hum ( $r = 0,308$ ), e inversamente con pH ( $r = -0,303$ ).



**Figura 2.18** Fluctuación estacional del potasio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

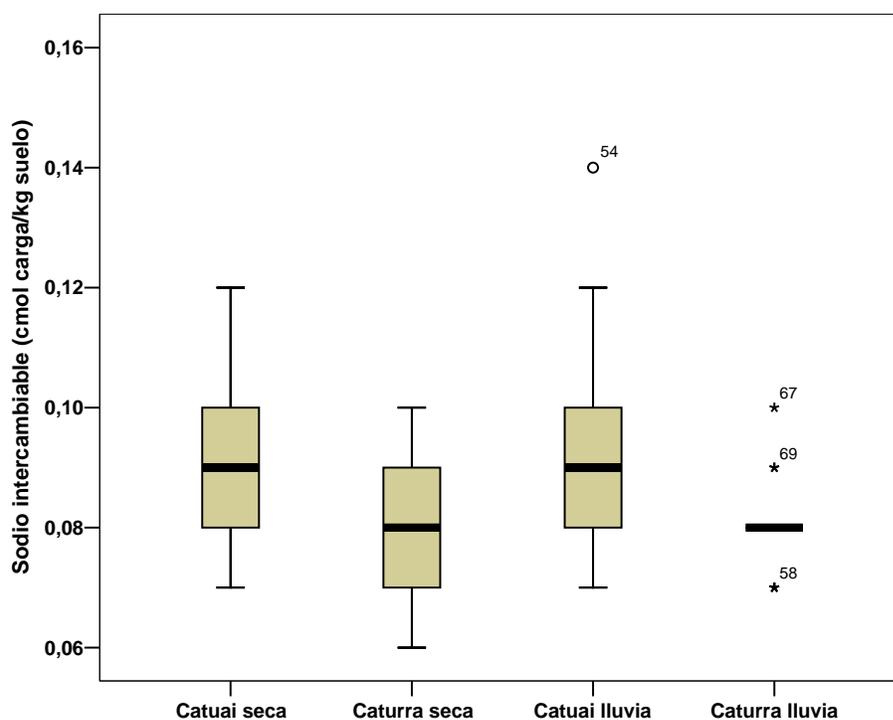
#### 2.4.14.4. Sodio (Na)

El análisis PERMANOVA muestra diferencias significativas  $p < 0,001$  para los suelos con diferentes variedades (Tabla 2.5 y Fig. 2.19), pero la dispersión multivariada es igualmente significativa  $p < 0,001$ , por ello no podemos asumir que la variación dependa sólo del tipo de variedad. Además dichos valores variaron entre 0,08 y 0,11  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  de suelo, los cuales se clasifican como niveles de Na entre bajo y muy bajo para suelos agrícolas (García, 2001; Rioja, 2002). Estos resultados concuerdan con los hallazgos obtenidos para CE cuyos valores están dentro del rango de los suelos no salinos.

Cardona y Sadeghian (2005) reportaron mayores valores del contenido de Na en suelos de cafetales bajo sombra comparados con suelos de cafetales a libre exposición solar, sin embargo los valores fueron muy bajos y variaron entre 0,01 y 0,05  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  de suelo, un poco menores a los encontrados en nuestro estudio. Notaro et al. (2014) en la región

semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción); hallaron los mayores valores de Na en el sistema agroforestal ( $1,9 \text{ mmol}^+/\text{dm}^3$ ) y menores valores en los sistemas biodinámicos y en el control ( $1,5 \text{ mmol}^+/\text{dm}^3$ ).

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el Na correlacionó significativa e inversamente ( $p < 0,05$ ) con el pH ( $r = -0,260$ ).

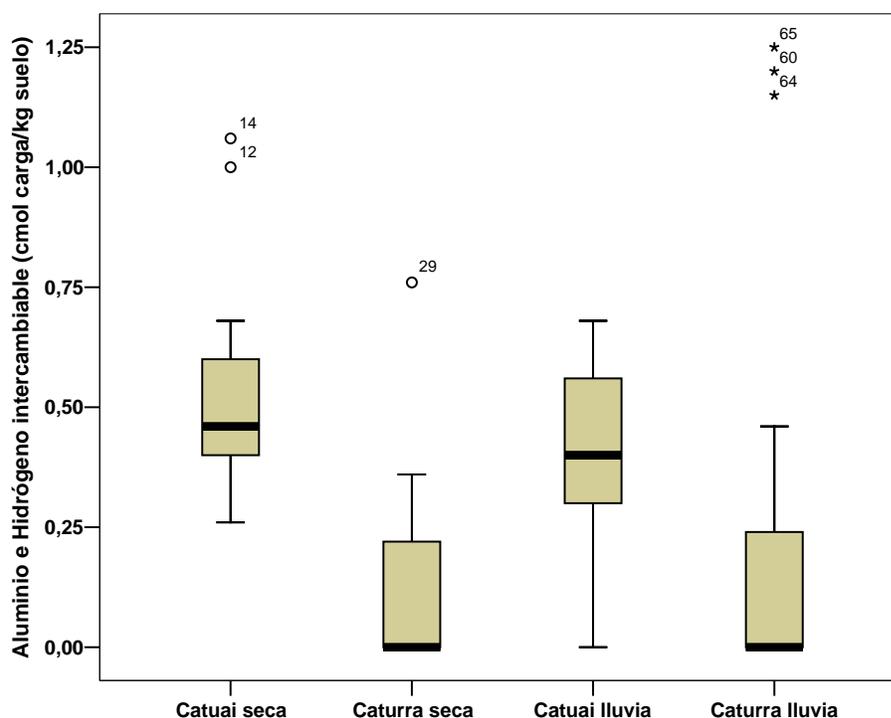


**Figura 2.19** Fluctuación estacional del sodio intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

#### 2.4.15. Aluminio e Hidrógeno intercambiables (Al+H)

En el análisis PERMANOVA se observa una interacción y diferencias significativas  $p < 0,001$  por variedades (Tabla 2.5 y Fig. 2.20). Los mayores valores ( $0,53 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ ) aparecen en los suelos con la variedad Catuaí estación seca y los menores ( $0,12 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ ), en suelos con la variedad Caturra estación seca, sin embargo estos valores son considerados bajos para suelos de textura media y fina, (Espinosa, 2001) como es el caso para los suelos en estudio.

El análisis de correlación bivariado (ANEXO II), nos muestra que el Al+H correlacionó significativa y negativamente ( $p < 0,01$ ) con A.A ( $r = -0,378$ );  $C_{mic}$  ( $r = -0,314$ );  $q_{Mic}$  ( $r = -0,377$ ); pH ( $r = -0,682$ ); Ca ( $r = -0,471$ ) y %limo ( $r = -0,522$ ). Estos resultados nos indican que a medida que disminuyen el Ca y pH, se aumenta el aluminio e hidrógeno intercambiables en estos suelos. (Donahue et al. 1981; Espinosa, 2001).



**Figura 2.20** Fluctuación estacional del Aluminio e Hidrógeno intercambiable para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

El café crece en suelos ácidos donde se hacen más disponibles el Al+H intercambiables, en los cuales el Al<sup>+3</sup> se hace más accesible a las plantas que otros elementos presentes en el suelo. Estos altos niveles de Al<sup>+3</sup> producen efectos tóxicos en las plantas de café (Muñoz-Sánchez et al., 2015). Estos autores encontraron los mayores niveles de Al<sup>+3</sup> en los suelos con menores valores de pH, encontrando además aluminio en bebidas y otros productos derivados del café cultivado en dichos suelos.

La incorporación de tres abonos orgánicos (Fertipollo, Biofertilizante La Pastora y Humus CB) disminuyeron las concentraciones del Al<sup>+3</sup>, promoviendo un mejor aprovechamiento de los nutrientes, incrementando así el rendimiento del cultivo de café [http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/CVCS19/uso\\_manejo\\_suelo/UMS30.pdf](http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/CVCS19/uso_manejo_suelo/UMS30.pdf) (consultado 8 de septiembre de 2015).

## 2.5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la variedad Catuaí favorece el desarrollo de mejores valores en las propiedades fisicoquímicas excepto por el pH y el aluminio e hidrógeno intercambiable, lo cual redundo en mejor calidad de los suelos, comparados con aquellos suelos sembrados con la variedad Caturra, posiblemente debido a la menor perturbación de dichos suelos, por el mayor tiempo de establecida la variedad Catuaí, así como al mayor contenido de COT observado en los suelos con esta variedad.

Entre las propiedades fisicoquímicas, la humedad gravimétrica (%Hum), la CE, pH, COT, CICR, Pasim, Mg y K mostraron variación significativa tanto por la época climática de muestreo como por las variedades de café establecidas, lo cual, nos permite sugerir que estos parámetros son importantes para evaluar la calidad de los suelos estudiados.

El análisis de correlación bivariado de Pearson nos muestra que el NT, CICR, %Hum, PT, Pasim y %limo son las propiedades fisicoquímicas que correlacionan con mayor número de propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y bioquímicas, indicando así la importancia de estas propiedades fisicoquímicas para evaluar la calidad de estos suelos.

## **CAPITULO III**

### **FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS: RESPIRACIÓN BASAL Y BIOMASA MICROBIANA, COMO INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ.**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Los microorganismos son fundamentales en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos del suelo e influyen sobre los ecosistemas y su fertilidad, interviniendo tanto en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos así como en la formación de la estructura del suelo (García et al., 2003; Dick, 1994).

La calidad del suelo depende de numerosas variables físicas, químicas, biológicas y bioquímicas. Dentro de estas variables, las microbiológicas (biomasa microbiana y respiración basal) y las bioquímicas (actividades enzimáticas) son las más sensibles y por lo tanto pueden proporcionar información de los cambios ocasionados por el estrés ambiental. Teniendo en cuenta que la actividad microbiológica es esencial para mantener la calidad de los suelos, la biomasa microbiana y su actividad son aspectos que deben ser considerados para determinar el estado de un sistema, o para entender cómo la actividad humana altera los ciclos biogeoquímicos al comparar zonas naturales y degradadas (Bastida et al., 2008).

El establecimiento y desarrollo de una cubierta vegetal estable, es imprescindible para que un suelo posea una calidad adecuada y mantenga su fertilidad natural, los microorganismos realizan procesos de oxidación, hidrólisis y degradación de la MOS, que influyen a la vez en los ciclos del C, N, P, y otros elementos, determinantes para el desarrollo de dicha cubierta vegetal y la calidad del suelo (García et al., 2003).

### **3.2. GENERALIDADES SOBRE BIOMASA MICROBIANA DEL SUELO Y SU ACTIVIDAD**

El suelo es fundamental e insustituible al gobernar la productividad de las plantas en los ecosistemas terrestres y mantener los ciclos biogeoquímicos, gracias a que los microorganismos del suelo degradan tarde o temprano, prácticamente todos los compuestos orgánicos incluyendo xenobióticos persistentes y compuestos polifenólicos naturales. Las poblaciones de organismos que habitan el suelo incluyen macrofauna, mesofauna, microfauna y microbiota. Se considera que entre el 80 y 90% de los procesos que ocurren en el suelo son reacciones mediadas por microorganismos (Nannipieri et al., 2003). Las comunidades microbianas son parte de una compleja red alimenticia que utiliza considerables cantidades de carbono, fijado por las plantas y liberado en la rizosfera (rizodepósitos) (Egamberdieva et al., 2011).

La biomasa microbiana ha sido definida en la sección 1.4.9 como la parte viva de la materia orgánica del suelo excluida las raíces de las plantas y los animales de tamaño mayor de 5 a 10  $\mu\text{m}^3$ . Elocuentemente David S. Jenkinson (Rothamsted Research, UK) la describe como “ el ojo de la aguja a través del cual toda los materiales orgánicos deben pasar”, ya que éstos son descompuestos a componentes inorgánicos simples como agua, dióxido de carbono, nitrato, fosfato y sulfato que las plantas pueden usar nuevamente. Generalmente se expresa en miligramos de carbono (nitrógeno, fósforo según sea el caso) por kilogramo de suelo seco o en microgramos por gramo de suelo seco. A pesar de su pequeño tamaño es un componente vital de la fracción orgánica del suelo siendo por un lado un reservorio lábil de C, N, P y S y por otro lado un agente descomponedor de los restos vegetales y animales, así como también para la formación del humus del suelo (Jenkinson y Ladd, 1981).

Las variaciones de la biomasa microbiana del suelo asociadas al carbono y nitrógeno (CBM y NBM) son mejores indicadores de las variaciones sufridas en la calidad de un suelo que el contenido de la MOS en general o que el COT en particular, debido a que responden de forma más rápida y sensible a los cambios que se puedan producir en el mismo (degradación, contaminación, uso del suelo, entre otros.) (García et al., 2003). Las medidas

de la biomasa microbiana pueden marcar a corto plazo la tendencia de variación que mostrará la materia orgánica a más largo plazo (Powlson et al., 1987). Díaz-Raviña et al. (1993) investigaron la contribución de la biomasa microbiana del suelo a las concentraciones de Ca, Mg, Na, K, y P disponibles en un amplio rango de suelos forestales. CBM y NBM, variaron desde 282 a 1614 mg C kg<sup>-1</sup> suelo seco y de 42 a 242 mg N kg<sup>-1</sup> suelo seco. Sus resultados mostraron que los microorganismos del suelo contenían cantidades substanciales de carbono y de los nutrientes inorgánicos y que su contribución al pool de los nutrientes disponibles fue mayor para N, importante para K, Mg y P, mientras que no fue significativo para Na.

La actividad microbiana es un término utilizado para indicar un amplio rango de actividades llevadas a cabo por los microorganismos en el suelo, mientras que la actividad biológica (conocida también como respiración edáfica) no solo refleja la actividad microbiana, sino también la actividad de otros organismos del suelo, incluyendo las raíces de las plantas. Varios métodos han sido usados para determinar la actividad microbiológica, algunos miden la tasa metabólica total; por ejemplo, el consumo de O<sub>2</sub> y/o la liberación de CO<sub>2</sub> las cuales reflejan la degradación catabólica bajo condiciones aeróbicas; la actividad de nitrificación la cual representa la tasa de oxidación de amonio a nitrato, y la actividad deshidrogenasa que representa el flujo intracelular de electrones hasta O<sub>2</sub>, que es debido a la actividad de varias enzimas intracelulares que catalizan la transferencia de hidrógeno y electrones de un compuesto a otro (Nannipieri et al., 2003).

La actividad microbiológica en el suelo también se puede medir determinando la respiración del suelo (respiración basal) sin sustratos y en presencia de residuos orgánicos o sustratos orgánicos específicos (respiración potencial o inducida). El CO<sub>2</sub> producido por la oxidación de los residuos o compuestos adicionados se puede determinar a partir de material marcado con <sup>14</sup>C. Puede ser erróneo en este caso, restar el CO<sub>2</sub> liberado en el suelo control del CO<sub>2</sub> liberado en el suelo tratado, debido al efecto priming (aceleración o inhibición de la mineralización de la materia orgánica nativa en el suelo tratado) (Nannipieri et al., 2003). La aplicación de técnicas moleculares puede mejorar la precisión en la determinación de las actividades microbianas en suelos. Los ensayos tradicionales determinan las tasas de los procesos metabólicos o actividades de reacciones específicas que pueden ser llevadas a cabo

por varias especies microbianas. Pero usando técnicas moleculares se puede determinar la especie responsable de los procesos que se están midiendo (Nannipieri et al., 2003).

La respiración basal representa la liberación de CO<sub>2</sub> a partir de la descomposición oxidativa de la MOS por la biota del suelo, se expresa como miligramos o microgramos de C-CO<sub>2</sub> por kg o g de suelo día, respectivamente (mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, µg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>).

### 3.3. CONSTANTES ECOFISIOLÓGICAS

La comparación de eficiencia de actividad de la biomasa microbiana del suelo en diferentes condiciones o el estudio de las influencias ambientales sobre cualquier función parece más útil cuando la actividad es expresada en términos de constantes fisiológicas como el  $q_{Mic}$  y el  $q_{CO_2}$ , o en otras palabras la aplicación de las constantes ecofisiológicas son otra forma de cuantificar los efectos de los cambios ambientales sobre las comunidades microbianas (Anderson y Domsch, 1986). El término “eco-fisiológicas” es usado para evaluar la biomasa microbiana con respecto a su entorno (Dilly, 2005).

#### 3.3.1. Cociente metabólico

El cociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) o tasa de respiración específica (Pirt, 1975), se ha definido como la relación entre la tasa de respiración por unidad de biomasa microbiana del suelo por unidad de tiempo [(mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>/ (mg C<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup>)].

La respiración basal es un reflejo del gasto de energía o actividad general por el pool de microorganismos nativos. Si la tasa de respiración basal está relacionada con el tamaño de la biomasa correspondiente, el cociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) obtenido expresa el C-CO<sub>2</sub> producido por unidad de biomasa y tiempo, con lo cual es posible comparar las comunidades microbianas en términos cuantitativos, (Anderson y Domsch, 1990).

El  $q\text{CO}_2$  sirve para cuantificar las situaciones de estrés que actúan sobre las comunidades microbianas. Mayores valores de  $q\text{CO}_2$  en suelos sometidos a algún tipo de estrés, podrían reflejar un mayor requerimiento de la energía de mantenimiento de la comunidad microbiana (Anderson y Domsh, 1993). Así mismo, el  $q\text{CO}_2$  podría ser un parámetro útil en el estudio de los cambios energéticos (optimización energética) en el desarrollo de los ecosistemas (Odum, 1969; Odum, 1985). Ha sido aplicado en investigaciones sobre el mantenimiento energético de la biomasa microbiana del suelo (Anderson y Domsch, 1985a, 1985b), en el estudio sobre efectos de la temperatura (Anderson y Domsch, 1986; Joergensen et al., 1990). Se ha sugerido que una disminución del  $q\text{CO}_2$  indica progreso (sucesión) hacia la madurez de los ecosistemas (Insam y Domsch, 1988; Insam y Haselwandter, 1989; Anderson y Domsch, 1990; Anderson y Domsch, 1993). Según Anderson y Domsch, (1990) cuando menos C de un sustrato orgánico es canalizado hacia el metabolismo energético, más carbono podría ser fijado en las células microbianas y cuando esto ocurre menor serán los valores de  $q\text{CO}_2$ , lo cual es indicativo de ecosistemas maduros.

Los datos presentados en relación con el  $q\text{CO}_2$ , por ejemplo, demuestran un cambio en la liberación de  $\text{CO}_2$  de la respiración basal por unidad de masa celular, debido a cambios de temperatura. Este es un fenómeno que realmente puede ocurrir bajo condiciones naturales. Para efectos comparativos un valor medio anual de cualquier actividad estudiada podría presentarse entonces como una constante ecofisiológica (Anderson y Domsch, 1986).

Bajo condiciones desfavorables, los organismos requieren de más energía para mantener la biomasa, por lo tanto, el C se transforma como C- $\text{CO}_2$  y los valores de  $q\text{CO}_2$  se aumentan (Dilly, 2005). Alta disponibilidad de metales pesados produce altos valores de  $q\text{CO}_2$  lo que indicaría estrés de la microbiota del suelo (Fließbach et al., 1994). El  $q\text{CO}_2$  es usado como un indicador indirecto fácilmente determinable, para evaluar la eficiencia de los microorganismos en la transformación de las fuentes de energía que controlan el crecimiento microbiano (Dilly, 2005).

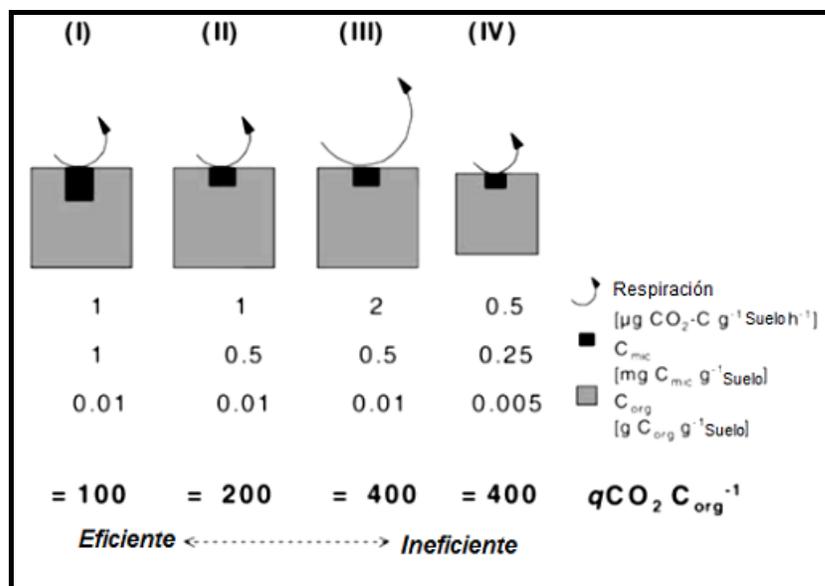
### 3.3.2. Cociente microbiano ( $q_{Mic}$ )

Se llama cociente microbiano a la relación entre el carbono microbiano y el carbono orgánico ( $C_{mic}/C_{org}$ ) (Sparling, 1992). Es considerado un indicador para la acumulación de materia orgánica y actividad biológica en el suelo (Sparling, 1992; Swift y Wommer, 1993). El cociente microbiano integra la calidad de las propiedades del suelo con el grado de colonización microbiana (Dilly, 2005). Es un índice importante de disponibilidad de la materia orgánica para la comunidad microbiana del suelo (Anderson y Domsch, 1989). Mayores valores del  $q_{Mic}$  favorecen el metabolismo energético y establecimiento de muchos microorganismos (Dilly, 2005).

### 3.3.3. Cociente de eficiencia metabólica

Definido como la relación  $qCO_2/C_{org}$  la cual hace referencia a la interrelación entre el uso eficiente del C y la calidad de la materia orgánica disponible en el suelo (Dilly et al., 2001; Dilly, 2005).

La Fig. 3.1 explica el uso de la relación  $qCO_2/C_{org}$ : su valor aumenta y simultáneamente el uso eficiente del C disminuye cuando se reduce a la mitad la biomasa microbiana y la tasa respiratoria permanece inalterada al igual que la cantidad de materia orgánica (I, II). Un aumento de la tasa respiratoria manteniéndose igual el  $C_{mic}$  y  $C_{org}$  conduce al aumento de este cociente, indicando así el uso ineficiente del C (III), siendo esto desfavorable desde el punto de vista energético para las comunidades microbianas, debido a las crecientes pérdidas de C. Cuando la tasa respiratoria, el contenido de  $C_{org}$  y  $C_{mic}$  disminuyen proporcionalmente, la relación  $qCO_2/C_{org}$  aumenta (IV). Por lo tanto un escaso nivel de sustratos determina que el valor del cociente de eficiencia metabólica se incremente y de este modo se podría evaluar si el sustrato es un factor limitante para el crecimiento de los microorganismos en un suelo (Dilly et al., 2001; Dilly, 2005).



**Figura 3.1** Ilustración de las tasas de variación entre la respiración basal,  $C_{mic}$  y contenido de  $C_{org}$  (Dilly et al. 2001).

En resumen para el coeficiente de eficiencia metabólica se pueden considerar las siguientes interrelaciones: (1) valores más altos de respiración conducen a menor eficiencia, (2) una mayor biomasa microbiana favorece o mejora la eficiencia, (3) una mayor disponibilidad de sustrato puede soportar más microorganismos o biomasa y aumentar su actividad (respiración). Teniendo en cuenta que las variaciones en las características microbianas se han explicado frecuentemente por cambios en el contenido de  $C_{org}$ , las relaciones  $C_{mic}/C_{org}$  y  $q\text{CO}_2/C_{org}$  son estructuralmente indicadores importantes de la interdependencia entre las comunidades microbianas con la materia orgánica y con el estado energético eco-fisiológico con respecto a diferentes niveles de C del suelo (Dilly, 2005).

### 3.4. PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGROECOLÓGICOS

Diversos estudios han demostrado la importancia de la MOS y su interacción con la biota del suelo en el mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes, estructura del suelo, productividad de las plantas, entre otros factores que redundan en mejorar la salud y calidad

del suelo. Se ha reportado que la biomasa microbiana es un indicador más sensible a los cambios en el manejo del suelo que otros parámetros como C y N total (Powlson et al., 1987). Autores como Kandeler et al. (2005) han resumido algunos estudios sobre el contenido de  $C_{mic}$  en diferentes ecosistemas (Tabla 3.1), según estos autores, el carbono de la biomasa microbiana ( $C_{mic}$ ), medido por cualquiera de los métodos de fumigación extracción, fumigación incubación o respiración inducida por sustrato, típicamente varía entre 100 – 1000 mg/kg de suelo en suelos agrícolas a entre 500 – 10.000 mg kg<sup>-1</sup> en suelos de bosques. Estos valores disminuyen rápidamente con el incremento de la profundidad y muestran distintos ciclos estacionales (Tabla 3.1). La mayor biomasa microbiana se ha encontrado en la capa de hojarasca rica en carbono orgánico de los bosques (Kandeler et al., 2005).

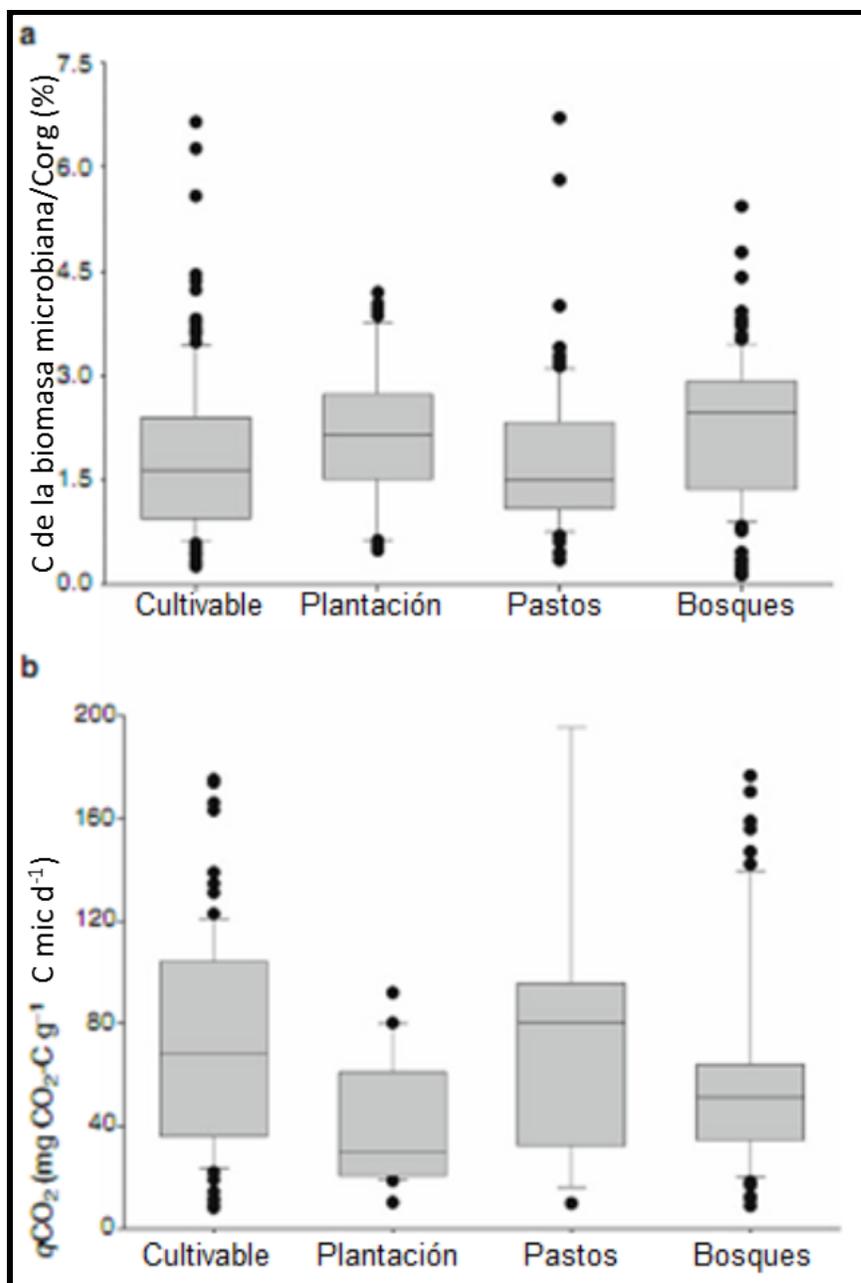
Independientemente de la variabilidad considerable en el contenido de  $C_{org}$  en los suelos, el  $C_{mic}$  generalmente corresponde a entre 0,9 – 6% del COT, con un valor medio del 2 – 3%. Lo cual indica una estrecha relación entre el  $C_{mic}$  y las fuentes de C y N disponibles en el suelo (Kandeler et al., 2005). Más recientemente, Joergensen, (2010), hace una revisión sobre el grado en que el uso del suelo en regiones tropicales afecta el contenido de materia orgánica, la biomasa microbiana del suelo y la actividad microbiana, así como las relaciones entre estos parámetros. La media para el cociente microbiano de todos los suelos fue de 1,7%, variando desde 0,1 al 8,2% (Fig. 3.2a), siendo menor para los suelos agrícolas y mayor para los suelos bajo cultivos perennes y bosques, lo cual sugiere una mejor disponibilidad de materia orgánica en suelos con vegetación arbórea permanente que en suelos agrícolas y pastizales. La media del  $qCO_2$  fue de 52 mgC-CO<sub>2</sub>/mg  $C_{mic}$  día, varía desde 8 a 520 (Fig. 3.2b). Los valores de  $qCO_2$  se incrementaron en el siguiente orden: suelos de pastos > suelos agrícolas > bosques > plantaciones perennes (Fig. 3.2b). Observándose diferencias significativas entre suelos de pastos y con cultivos perennes, como también entre suelos agrícolas y plantaciones (Joergensen, 2010). Este autor concluye que las relaciones entre el  $C_{mic}$ , la respiración basal y la MOS en los suelos del trópico, son muy similares a las de los suelos de climas húmedos templados, lo cual permite usar con confianza estos parámetros para formular índices de calidad y fertilidad en suelos tropicales. Además encontró que los suelos agrícolas tropicales, donde el pH generalmente es bajo, poseen altos valores del cociente metabólico ( $qCO_2$ ) y bajos en el cociente microbiano ( $C_{mic}/C_{org}$ ), indicando así el

impacto negativo del uso intensivo del suelo (convencional) sobre su fertilidad (Joergensen, 2010).

**Tabla 3.1** Contenido de C microbiano (C<sub>mic</sub>) de suelos de diferentes ecosistemas.

Ecosistema	Horizonte (cm)	C <sub>mic</sub> (mg/kg)	C <sub>org</sub> (%)
Suelos agrícolas	0 – 20	70 – 720 <sup>a</sup>	1,0 – 3,8
	0 – 15	420 – 980	2,5 – 5,5
	0 – 5	250 – 380	3,0 – 6,0
Pastizales	Hojarasca	9650	2,1
	0 – 10	2670	2,9
	10 – 20	1120	1,9
	20 – 30	470	2,0
Bosque templado	Hojarasca	10830	2,3
	0 – 10	1120 – 1510	ND
	0 – 10	420 – 1770 <sup>a</sup>	0,9 – 2,6
	0 – 5	800 – 1670	1,2 – 6,0
	5 – 10	160 – 430	ND
	5 – 10	370 – 600	ND
Bosque subtropical	0 – 10	330 – 1090	0,9 – 1,8
	10 – 20	200 – 790	0,7 – 1,3
Bosque tropical	0 – 10	210 – 490	2,1 – 3,4
	0 – 10	950 – 1970	1,4 – 2,9
	0 – 12	170 – 860	0,5 – 1,1
Tundra	0 – 5	2990 - 13900	2,1 – 3,6
Praderas alpinas	0 – 10	1000 – 2750	1,7 – 2,8
Semiárido	0 – 15	120 – 330	3,2 – 4,8
Árido - Mediterráneo	0 – 20	30 – 700	0,8 – 8,0

La biomasa microbiana fue medida por el método de fumigación extracción o por el método de la respiración inducida por sustrato. (Adaptada Kandeler et al., 2005). ND, no determinado <sup>a</sup>Resultados basados en la medición de la respiración inducida por sustrato.



**Figura 3.2** Gráficos de cajas (boxplots) para el uso específico de la tierra (a) cociente microbiano (qMic) y (b) cociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) en suelos del trópico. (Adaptado de Joergensen, 2010).

El estrés subletal reduce la eficiencia en el uso del sustrato, es decir, más sustrato debe ser catabolizado a CO<sub>2</sub> y menos sustrato es incorporado a la biomasa microbiana (Anderson y Domsch, 1993; Anderson y Joergensen, 1997). La relación significativamente inversa entre qCO<sub>2</sub> y qMic ( $r = -0,33$ ;  $p < 0,001$ ) para suelos tropicales revela la

interdependencia de los procesos de catabolismo y anabolismo en los mismos (Joergensen, 2010; Anderson y Domsch, 1990).

### **3.5. MATERIALES Y METODOS**

La descripción del sitio del experimento, el diseño experimental utilizado, así como toda la información sobre el muestreo del suelo, análisis de laboratorio y análisis estadístico se presentan en el Capítulo II, secciones 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 y 2.3.5, respectivamente. El análisis de laboratorio para las propiedades microbiológicas se describe a continuación.

#### **3.5.1. Propiedades microbiológicas**

##### **3.5.1.1. Respiración Basal (Rbas)**

Se usó el método empleado en el Laboratorio de Ecología de Suelos del IVIC, modificado por el Dr. Jorge Paolini, basado en los métodos descritos por Stozky (1965) y García et al. (2003). Se usan 20 g de suelo fresco, los cuales se humedecen hasta 60% de su capacidad de retención de agua y se incuban a  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 7 días con un vial lleno con 10 mL de hidróxido de sodio 0,3 M.

##### **3.5.1.2. Biomasa Microbiana**

Se usó el método de la respiración inducida por sustrato (RIS) (Anderson y Domsch, 1978). Se usan los mismos suelos (20 g) del experimento de respiración basal a los cuales se les añade 1 mL de una solución de glucosa al 8% y se incuban a  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  con 10 mL de hidróxido de sodio 0,05 M durante 6 horas.

En ambos metodos el CO<sub>2</sub> liberado es atrapado por el hidróxido de sodio, se precipita como BaCO<sub>3</sub> con 2 mL de 0,5 M de BaCl<sub>2</sub> y el hidróxido en exceso se titula con HCl patrón (0,2 y 0,1 M Titrisol, respectivamente), usando fenolftaleína como indicador. El factor de conversión de mg CO<sub>2</sub>100g<sup>-1</sup> ssh<sup>-1</sup> = 20,6 mg C<sub>mic</sub> 100 g<sup>-1</sup> ss (Schinner et al., 1995).

### 3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos para las propiedades microbiológicas estudiadas y los diversos índices ecofisiológicos.

**Tabla. 3.2** Media ± error estándar para las propiedades microbiológicas y las constantes ecofisiológicas.

Variable	Catuaí		Caturra		Variedad		Época de muestreo		Interacción
	seca	lluvia	Seca	lluvia	Pman	Permd	Pman	Permd	
Rbas	37,0±2,1	25,4±2,4	31,8±2,7	18,8±1,5	**	ns	***	ns	ns
C <sub>mic</sub>	340±25	338±20	363±18	359±15	ns	ns	ns	ns	ns
qMic	0,59±0,04	0,59±0,04	0,83±0,04	0,88±0,05	***	ns	ns	ns	ns
qCO <sub>2</sub>	4,8±0,3	3,2±0,3	3,8±0,4	2,2±0,2	**	ns	***	ns	ns
qCO <sub>2</sub> /C <sub>org</sub>	83,7±7,2	53,9±3,4	88,8±11,4	53,5±4,7	ns	ns	***	ns	*

Rbas: mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> suelo día<sup>-1</sup>; C<sub>mic</sub>: mg C kg<sup>-1</sup> suelo; qMic: (%); qCO<sub>2</sub>: mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C<sub>mic</sub> h<sup>-1</sup>; qCO<sub>2</sub>/C<sub>org</sub>: mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C<sub>mic</sub> h<sup>-1</sup>/(gC<sub>org</sub> g<sup>-1</sup> suelo) Nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (Pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías (\* p<0,05; \*\* p<0,01; \*\*\* p<0,001; ns= no significativo al 95%).

#### 3.6.1. Respiración basal (Rbas) (mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

Los mayores valores de la respiración basal se observan en la estación seca respecto a la lluviosa para ambas variedades. Así el promedio obtenido para la misma fue el 14% más alto en el suelo con la variedad Catuaí estación seca, alcanzando 37,0 ± 2,1 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> comparado con 31,8 ± 2,4 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> en el suelo con la variedad Caturra estación

seca, igualmente el promedio obtenidos en el suelo con la variedad Catuaí estación lluviosa, fue 26% más alto que el promedio obtenido en el suelo con la variedad Caturra estación lluviosa (Tabla 3.2 y Fig. 3.3).

El análisis PERMANOVA de los datos muestra una variación significativa ( $p < 0,01$ ) entre las variedades, con el promedio más alto en el suelo cultivado con la variedad Catuaí (Fig. 3.3). La dispersión multivariada no es significativa (PERMDISP), lo cual permite considerar que la variación responde al tipo de variedad (Tabla 3.2). También se observa una variación significativa ( $p < 0,001$ ) en la época de muestreo (Fig. 3.3 y Tabla 3.2). Los resultados no muestran interacción, lo que nos indica que la variación por variedad es independiente de la variación por estacionalidad.

Los mayores valores encontrados en la estación seca pueden estar relacionados con un aumento de la actividad metabólica de la microbiota, favorecido por mejor aireación del suelo (Dilly, 2005). También puede ser posible que un suelo seco o con poca humedad cuando en el laboratorio se lleva a condiciones óptimas de humedad 60% de su capacidad de retención de humedad los microorganismos tienen un mayor acceso a sustratos y se dispara su actividad respiratoria basal.

Además hay que considerar un mayor aporte de restos carbonados por muerte de raíces en la precedente época lluviosa (Nunes et al. 2009). Porciones importantes de biomasa de raíces y exudados que son dejados en el suelo, funcionan como sustratos importantes para el crecimiento microbiano en el suelo. Sin embargo, el papel de las raíces como fuente de materia orgánica no ha sido bien estudiado bajo condiciones tropicales (Balota y Chaves 2011)

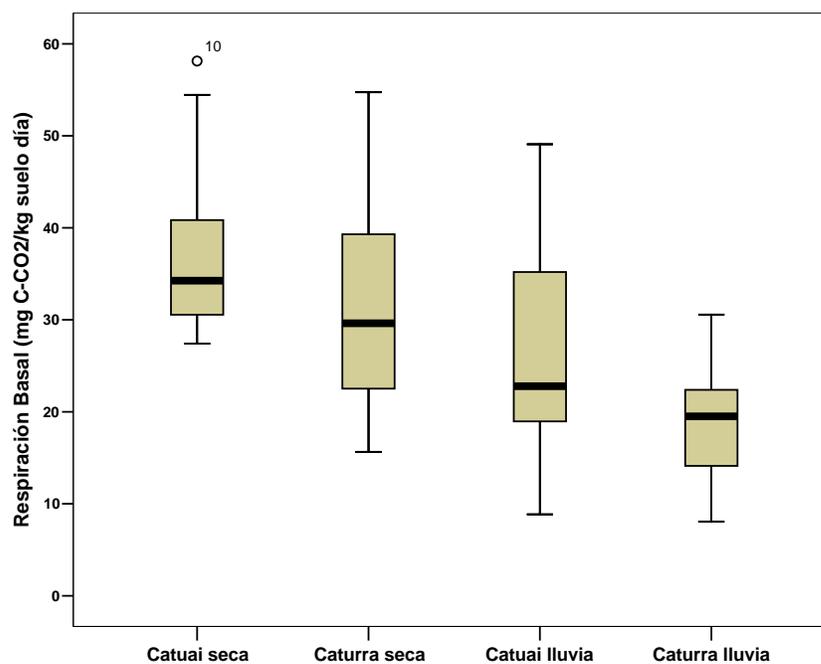
Con base en estos resultados podemos sugerir que la Rbas resultó sensible a las variaciones tanto por el tipo de variedad como por la estacionalidad en los suelos cafetaleros objeto de este estudio.

Severino y Oliveira, (1999) reportan mayor mineralización del carbono en sistemas agroforestales brasileños (estado de Ceará) de café con *Inga spp.* (44,02 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>), prácticamente iguales a los suelos bajo vegetación nativa (42,69 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>); valores intermedios en sistemas *Inga spp.* – banano – café (27,15 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) y los menores valores en sistemas con sólo banano y áreas degradadas (16,97 y 14,59 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, respectivamente). Mientras que Alfaro, (2004) reporta valores, que varían entre 2,22 y 8,84 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> en diversos sistemas agroforestales con café de Guatemala, esta última autora no reveló diferencias estadísticas entre época seca y época lluviosa. Estos últimos resultados fueron inferiores a los de este estudio.

Almeida et al. (2007) en Brasil (Minas Gerais) para un sistema agroforestal de café con *Inga subnuda* encontró un valor de 37,49 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> y para un sistema de café a plena exposición solar un valor de 43,73 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>; estos valores concuerdan con los observados en este estudio.

Estudios realizados en diversas épocas del año muestran que la humedad del suelo tiene una influencia capital en la respiración basal, así Glaeser et al. (2010) en Brasil (Mato Grosso do Sul) para sistemas de café orgánico sobre Oxisoles de textura arenosa muestreados a una profundidad de 0 – 10 cm hallaron valores comprendidos entre 4,93 y 17,04 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> en la época seca (agosto) y de 12,0 a 21,67 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> en la época lluviosa (abril); con incrementos estadísticamente significativos entre 21 y 143 % para la época de muestreo y estos autores asocian a la temperatura ambiental las diferencias observadas. Nunes et al. (2009) también en Brasil (Minas Gerais) en suelos tipo oxisoles y muestras tomadas a profundidad de 0 – 10 cm, obtuvieron los mayores valores de R<sub>bas</sub> en suelos de bosque nativo (vegetación secundaria preservada durante 40 años) comparados con suelos bajo sistema de monocultivo con café variedades Mundo Novo y Catuaí (valores comprendidos entre 4 y 22 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> para los meses de julio, época seca y enero, época lluviosa, respectivamente); observando además una mayor reducción en los períodos de menor humedad del suelo. Los resultados de ambos estudios no concuerdan con lo observado en este estudio (es decir R<sub>bas</sub> seca > R<sub>bas</sub> lluvia) quizás debido a diferencias en los tipos de suelos, profundidad de muestreo y regímenes climáticos.

Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción), donde encontraron los mayores valores de Rbas en el bosque nativo (1425 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) y los menores en el control (566 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>), valores sensiblemente altos comparados con los hallados en esta investigación y con la mayoría de resultados reportados en la literatura. Estos autores consideran que las mayores pérdidas de CO<sub>2</sub> podrían estar asociadas a mayores contenidos de COT; así un mayor suministro de MOS podría favorecer mayor población de bacterias, las cuales atacan rápidamente los sustratos orgánicos y aceleran los procesos de oxidación biológica. Mientras que también en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, observando en la capa superficial del suelo (0 – 10 cm) mayores valores de Rbas en el sistema de manejo intercalado con *Brachiaria decumbens* (211 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>), y los menores valores en el sistema intercalado con *Arachis pintoi* (161 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). Estos valores marcadamente mayores a los hallados en este estudio.



**Figura 3.3** Fluctuación estacional de la Respiración basal para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

En Venezuela se ha determinado la respiración basal en diversos suelos de zonas cafetaleras del país; así Suarez, (2005) comparó suelos con café bajo manejo orgánico vs convencional en el estado Lara, clasificados taxonómicamente en los ordenes Orthents (Typic udorthents) y Ustults, ambos superficiales con buenas propiedades físicas pero con baja fertilidad, en la cuenca alta del río Yacambú, estado Lara, en muestras tomadas a 5 cm de profundidad, observó mayores valores bajo sistema orgánico, y estos variaron entre 3,43 y 18,54 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>, respectivamente. Paolini y Murillo, (2008) investigaron la R<sub>bas</sub> en suelos con café del estado Miranda bajo sombra reportando un valor de 17,8 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> y a plena exposición solar de 16,15 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. Paolini et al. (2008) hallaron valores que variaron entre 15,50 y 26,11 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> en suelos cafetaleros bajo diferente uso de la tierra (todos sistemas agroforestales pero bajo manejo tradicional), en el estado Trujillo, estos valores están dentro del rango encontrado en este estudio.

Mayores tasas de respiración del suelo se han medido en sistemas bajo manejos orgánicos o conservacionistas comparados con sistemas convencionales, debido a que esa práctica incrementa los residuos orgánicos fácilmente descomponibles, por muerte de raíces en la superficie o por el aporte de material orgánico sobre la superficie del suelo favoreciendo la actividad microbiana (Reganol et al., 1993; Lotter, 2003; Payan, 2005; Trasar-Cepeda et al., 2008a; Nunes et al., 2009; Araujo et al., 2009; Zhang et al., 2011; Partelli et al., 2012).

La R<sub>bas</sub>, correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con el qCO<sub>2</sub> ( $r = 0,727$ ); qCO<sub>2</sub>/C<sub>org</sub> ( $r = 0,599$ ); Pasim ( $r = 0,320$ ); NT ( $r = 0,388$ ); y correlacionó significativa pero negativamente con el %limo ( $r = -0,309$ ) (anexo II).

### **3.6.2. C de la Biomasa Microbiana (CBM o C<sub>mic</sub>) (mgC<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup>)**

Según los resultados del análisis PERMANOVA, esta variable no mostró variaciones significativas estacionales ni por variedades durante el estudio (Tabla 3.2 y Fig. 3.4). Los valores promedio variaron para la variedad Caturra entre 363 ± 18 mg C<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup> en la estación seca y 359 ± 15 mg C<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup> en la estación lluviosa; mientras que en suelos con la variedad Catuaí varió entre 340 ± 25 mg C<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup> en la estación seca y 338 ± 20 mg C<sub>mic</sub>kg<sup>-1</sup>

en la estación lluviosa. Se puede observar una ligera tendencia a mayores valores en los suelos bajo la variedad Caturra y en la estación seca (Tabla 3.2 y Fig. 3.4). El hecho de no detectar diferencias significativas de la biomasa microbiana para las épocas de muestreo y entre las variedades, posiblemente se debe a que sobre la superficie de los suelos cafetaleros bajo sombra, sin aplicación de insumos agrícolas y bajo fertilización orgánica pasiva, se forma un mantillo estable, a partir de la hojarasca y residuos vegetales provenientes tanto de los arbustos de café como de los árboles de sombra, el cual: a) regula la dinámica del agua en el agroecosistema, esto significa que el agua de lluvia penetra lentamente el mantillo, gran parte se almacena en ese mantillo y percola lentamente hacia el suelo, manteniendo la humedad del sistema a una tasa regulada durante un período de tiempo relativamente largo después que cesan las lluvias; b) el mantillo va a permitir un aporte permanente de C orgánico al suelo, el cual junto con la humedad, favorecen el crecimiento y desarrollo de las comunidades microbianas; c) el aporte de C orgánico favorece propiedades físicas del suelo, como estructura, porosidad, densidad aparente, aireación, los cuales a su vez favorecen un mejor desarrollo radicular; d) la baja perturbación en estos agroecosistemas favorece la diversidad florística, como también de la microbiota; e) se reduce la erosionabilidad hídrica y eólica f) se favorece el ciclaje de nutrientes, mejorando así las propiedades químicas y disponibilidad de dichos nutrientes. La interacción de estos factores favorece la formación en un agroecosistema estable. La vegetación y tipo de suelo son factores claves que pueden modificar las características del suelo y son fundamentales para mantener una microbiota estable (Bastida et al., 2008).

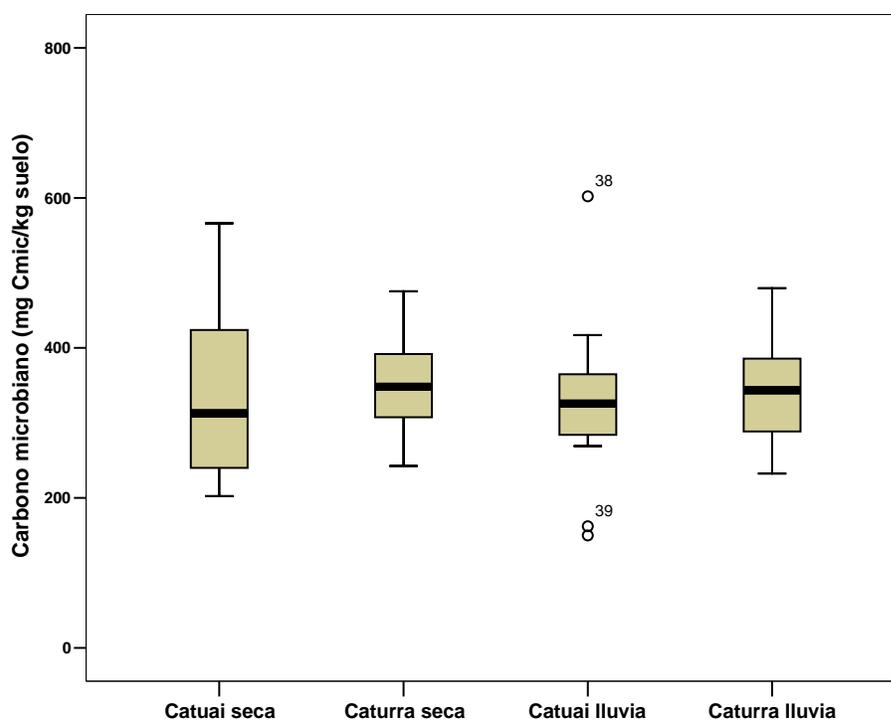
En general se han observado mayores contenidos de  $C_{mic}$  bajo sistemas de manejos conservacionistas del suelo cuando se comparan con sistemas de manejo convencional (Glover et al., 2000; D'Andréa et al., 2002; Matsuoka et al., 2002; Madejón et al., 2007; Maluche-Baretta et al., 2007; Moeskops et al., 2010; Zhang et al., 2011).

Varios investigadores han encontrado en suelos cafetaleros valores de  $C_{mic}$  menores bajo sistemas de manejo convencional comparados con sistemas de manejo orgánico (Aquino et al., 1998; Balota et al., 2004; Porras, 2006; Araujo et al., 2009; Partelli et al., 2012), o con sistemas agroforestales de café (Alfaro, 2004; Almeida et al., 2007).

Theodoro et al. (2003) compararon diferentes sistemas de cultivo de café con el bosque nativo en el Estado de Minas Gerais - Brasil, hallaron diferencias significativas en la estacionalidad observando los mayores valores de  $C_{mic}$  en la época lluviosa (promedio 526 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>) que en la seca (promedio 258 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>), sin embargo estos autores no encontraron diferencias significativas entre los sistemas estudiados: bosque nativo, café orgánico, café hacia transición orgánica y café convencional, nuestros hallazgos están dentro de estos valores. Igualmente caen dentro del rango de valores hallados en un estudio realizado por Suárez, (2005) en suelos clasificados taxonómicamente en los ordenes Orthents (Typic udorthents) y Ustults, ambos superficiales con buenas propiedades físicas pero con baja fertilidad, en la cuenca alta del río Yacambú, estado Lara, donde se comparó diferentes sistemas de manejo del suelo sobre muestras tomadas a 5 cm de profundidad, se encontró gran variación para el  $C_{mic}$ , los mayores valores (1060 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>), bajo sistema de café orgánico más sombra y los menores (182 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>), bajo sistemas de café más fertilización química sin sombra.

Nunes et al. (2009) al comparar sistemas de bosque secundario (40 – 30 años de antigüedad), con sistemas de monocultivos de café Mundo Novo (22 años de establecido) y Catuaí (16 años de establecido) en el Estado de Minas Gerais – Brasil, observaron una tendencia de mayores valores de  $C_{mic}$  en los suelos de sistemas de bosques (40 años), seguidos por sistemas de bosque de 30 años y por último los sistemas de monocultivos con café. El sistema con Catuaí 16 años mostró valores significativamente superiores (350 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>) al sistema con Mundo Novo 22 años (200 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup>). Los valores del  $C_{mic}$  fueron superiores en la época de mayor humedad del suelo en todos los sistemas estudiados. Por otra parte, Balota y Chaves (2011), encontraron incrementos del  $C_{mic}$  en los suelos tanto bajo el dosel de los arbustos de café con valores entre 118 y 305 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup> suelo, como en el suelo del espacio entre surcos (calles) con valores entre 204 y 427 mg  $C_{mic}$  kg<sup>-1</sup> suelo, al evaluar cultivos de café intercalados con diferentes cultivos de leguminosas, observando los mayores valores en sistemas con *Leucaena leucocephala* y *Arachis hypogaea*. Nuestros hallazgos están dentro del intervalo de estos valores.

Partelli et al. (2012), investigaron estacionalmente sistemas de café orgánico con convencional en el Estado Espírito Santo – Brasil, reportaron mayores valores para el  $C_{mic}$ , en los suelos bajo sistemas de café orgánico  $189 \text{ mg } C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  a  $147 \text{ mg } C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  bajo manejo convencional, mayores en verano que en invierno y 67% mayores en la capa superior del suelo (0 – 10 cm) comparados con la capa de suelo a profundidad de 10 – 20 cm. Valores menores a los encontrados en nuestro estudio, posiblemente debido a que estos investigadores usaron el método de fumigación – extracción (Vance et al., 1987).



**Figura 3.4** Fluctuación estacional del Carbono microbiano para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Aquino et al. (1998), también en Brasil, estudiando el  $C_{mic}$  durante el período de transición de sistema de café convencional a orgánico, muestreando a 0-5 cm de profundidad en diferentes épocas del año, hallaron una variación entre  $38-168 \text{ mg } C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para suelos bajo manejo orgánico y entre  $51-122 \text{ mg } C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para suelos bajo manejo convencional, debido al mayor aporte de residuos orgánicos aportados al suelo.

Glaeser et al. (2010) también en Brasil comparan diferentes sistemas de café orgánico en dos épocas del año y no detectan diferencias entre sistemas y época de muestreo; siendo sus promedios de 180 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para la época seca (agosto) y de 114 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para la época de lluvia (abril). Estos valores resultaron ser inferiores a los de este estudio, probablemente relacionado a la textura arenosa de los suelos y el bajo contenido de carbono orgánico del suelo, o también debido a que estos investigadores usaron el método de fumigación – extracción (Vance et al., 1987).

En la literatura también se indica la ausencia de variabilidad estacional de la biomasa microbiana en climas tropicales con dos estaciones climáticas bien marcadas como es el caso de cafetales situados al Norte del Ecuador; así Alfaro, (2004) en un estudio de sistemas agroforestales de café en Guatemala (siendo los árboles de sombra más comunes Ingas, Eritrinas, Gravileas y bananos) reportó variaciones de  $C_{mic}$  comprendidas entre 512–1286 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para la época de final de lluvia y entre 458–995 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  para la época de inicio de lluvias; pero la autora no detectó diferencias estadísticas entre ambas épocas para la mayoría de los sistemas agroforestales estudiados, pero sí observó diferencias significativas con los valores más altos en suelos franco arcillosos (1286 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$ ) respecto a los suelos franco arenosos (458 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$ ) hallando estrecha relación de estos valores con los niveles de carbono y arcilla de dichos suelos. En el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez (Costa Rica), Porras (2006) estudió la biomasa microbiana de sistemas agroforestales de café orgánico y convencional en dos épocas del año y no detectó diferencias significativas para la época de lluvia (media = 763 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$ ) y sequía (media = 731 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$ ). Ambos estudios superan a los valores de este trabajo probablemente relacionado con el tipo de suelos (derivados fundamentalmente de ceniza volcánica y con altos contenidos de materia orgánica; 47-122 g C  $\text{kg}^{-1}$ ) y al mejor manejo (adición de enmiendas orgánicas, podas frecuentes de los árboles de sombra).

En un estudio realizado en los valles del Rift en Etiopía, sobre el uso del suelo en un andosol tropical, se compararon dos sistemas agrícolas con un sistema agroforestal cafetalero, observándose menores valores de biomasa microbiana activa en el sistema agrícola más intensamente cultivado, los valores variaron entre 6 y 22 mg  $C_{mic} \text{ kg}^{-1}$  (Abera y

Wolde-Meskel, 2013). Estos valores son extremadamente bajos al ser comparados con los encontrados en este estudio, posiblemente debido al método utilizado por estos autores quienes aplicaron como sustrato una solución de glutamato  $0,25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de suelo seco a  $15^\circ\text{C}$  durante 20 h sobre 10 g de suelo seco. Mientras que Pabst et al. (2103) en un estudio realizado en el Monte Kilimanjaro en la región noreste de Tanzania, hallaron un fuerte descenso en la biomasa microbiana después de la conversión de pastizales a plantaciones de café, posiblemente debido al uso intensivo de plaguicidas para la producción de café, además los restos vegetales fueron removidos después de la poda de los arbustos de café lo cual se traduce en una reducción del COS y baja disponibilidad de sustratos para la descomposición microbiana.

Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción), donde encontraron los mayores valores de biomasa microbiana en el bosque nativo ( $358 \text{ mg C}_{\text{mic}}\text{kg}^{-1}$ ), estos investigadores no hallaron diferencias significativas entre los sistemas con café en los cuales los valores reportados variaron entre 242 y  $284 \text{ mg C}_{\text{mic}}\text{kg}^{-1}$ , valores menores a los encontrados en este estudio. Mientras que también en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, hallando en la capa superficial (0 – 10 cm), mayores valores de biomasa microbiana en el sistema de manejo intercalado con *Arachis pintoi* ( $450 \text{ mg C}_{\text{mic}}\text{kg}^{-1}$ ), y los menores valores en el sistema intercalado con *Brachiaria decumbens* ( $273 \text{ mg C}_{\text{mic}}\text{kg}^{-1}$ ). Nuestros resultados están dentro de este rango de valores.

Durango et al. (2015) en Costa Rica encontraron en agroecosistemas café – banano y café valores de biomasa microbiana de 111 y  $77 \text{ mg C}_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1}$  respectivamente, estadísticamente inferiores a los hallados en ese mismo estudio para suelos de bosque ( $423 \text{ mg C}_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1}$ ). Estos autores asocian los mayores valores de biomasa microbiana en el agroecosistema bosque con los mayores contenidos de materia orgánica en estos suelos, asociado a la pérdida de la materia orgánica en el cultivo de café y en el asocio café - banano.

Los valores reportados por estos investigadores para los agroecosistemas café – banano y café resultaron ser inferiores a los encontrados en nuestra investigación.

El  $C_{mic}$  correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con:  $\beta$ -Glu ( $r = 0,389$ ); pH ( $r = 0,306$ ); e inversamente con: Al+H  $r = (-0,314)$  (anexo II).

Cabe señalar que en varios de los trabajos consultados (Durango et al. 2015; Notaro et al. 2014; Pabst et al. 2013; Lanmel et al. 2015; Partelli et al. 2012; Teodoro et al. 2003), estos investigadores usaron el método de fumigación – extracción (Vance et al., 1987) para evaluar el CBM, lo cual pudo ser también una razón para las diferencias entre aquellos resultados y los reportados en este trabajo.

### **3.6.3. Cociente metabólico ( $qCO_2$ ) [ $mg\ C-CO_2/g\ C_{mic} \cdot h$ ]**

El análisis PERMANOVA para esta variable eco-fisiológica mostró variaciones significativas ( $p < 0,01$ ) entre variedades y ( $p < 0,001$ ) para la época de muestreo, en ninguno de los casos se observa dispersión multivariada significativa (PERMDISP), por ende las variaciones son intrínsecas a las variedades y a la estacionalidad e independientes entre sí. En la Tabla 3.2 y Fig. 3.5 vemos que los mayores valores se obtuvieron en suelos con la variedad Catuaí, y en ambas variedades fueron mayores durante la estación seca. Estos hallazgos están en concordancia con lo antes discutido para la respiración basal de estos suelos. Así entonces los mayores valores del  $qCO_2$  observados en los suelos con la variedad Catuaí comparados con los suelos de la variedad Caturra, pueden estar relacionados con los valores superiores de actividad microbiana ( $R_{bas}$ ), la cual a su vez puede ser promovida por los mayores contenidos de COT en los suelos con la variedad Catuaí (Tabla 3.2) y a un aumento de la actividad metabólica de la microbiota, favorecido por mejor aireación del suelo (Dilly, 2005). Estos resultados también se pueden explicar teniendo en cuenta que los valores de  $qCO_2$  pueden aumentar cuando la MOS contiene altos niveles de compuestos orgánicos fácilmente disponibles (Cheng et al., 1996; Dilly y Munch, 1996).

Desde otro punto de vista podría ser posible que las variaciones observadas reflejen el estrés producido por la disminución en el contenido de humedad durante la estación seca, lo cual está de acuerdo con lo reportado por numerosos autores (Anderson y Domsh, 1993; Fließbach et al., 1994; Anderson, 2003; Dilly, 2005; Pimentel et al., 2006; Nunes et al., 2009), quienes sugirieron que mayores valores de  $q\text{CO}_2$ , podrían reflejar un mayor requerimiento de la energía de mantenimiento de la comunidad microbiana de ese suelo. Otro factor de estrés que puede estar influenciando los mayores valores de  $q\text{CO}_2$  en los suelos con Catuaí es el pH, el cual fue significativamente menor en estos suelos, comparados con los valores de pH obtenidos para suelos con la variedad Caturra, lo cual está de acuerdo con lo observado por (Anderson y Domsch, 1993; Aciego y Brookes, 2008).

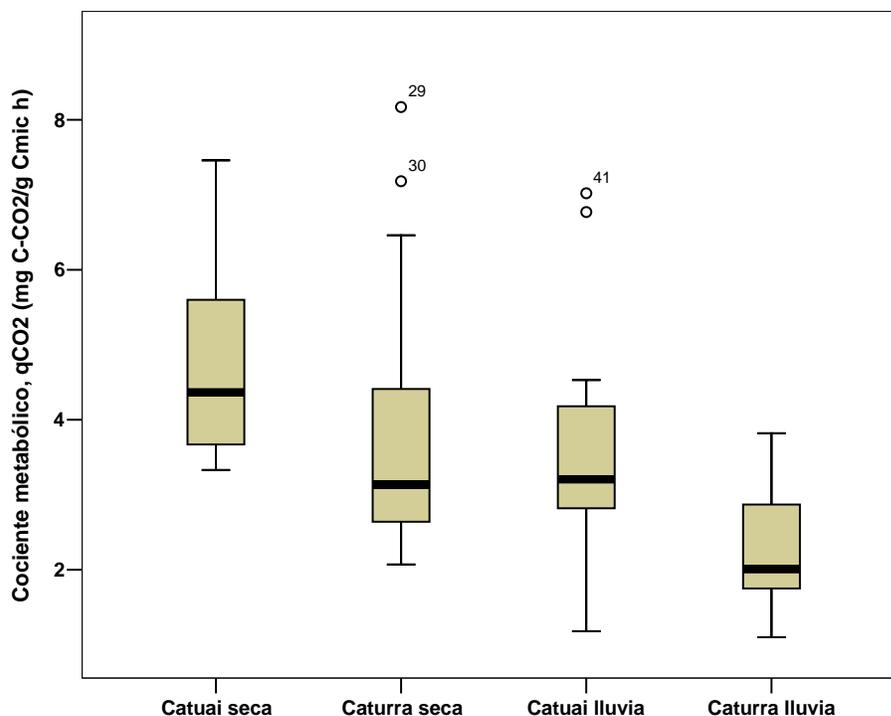
Es de resaltar que los valores obtenidos variaron entre 4,77 y 2,21 ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ ), los cuales son bajos, indicándonos la madurez de ambos ecosistemas, así como lo han discutido varios autores (Insam y Domsch, 1988; Insam y Haselwandter, 1989; Anderson y Domsch, 1990; Joergensen, 2010; Anderson y Domsch, 1993; Anderson, 2003; Dilly, 2005; Abera y Wolde-Meskel, 2013). Los valores hallados en este estudio están en concordancia con los reportados en la mayoría de estos trabajos.

Varios autores han sugerido la relación entre menores valores de  $q\text{CO}_2$  con ecosistemas más estables (Insam y Domsch, 1988; Insam y Haselwandter, 1989; Anderson y Domsch, 1990; Joergensen et al., 1990; Anderson y Domsch, 1993; Anderson, 2003; Dilly, 2005; Abera y Wolde-Meskel, 2013), sin embargo este no fue el caso para las diferencias encontradas en nuestros resultados, si tenemos en cuenta que la variedad Catuaí fue establecida hace aproximadamente 20 años, mientras la variedad Caturra fue establecida hace aproximadamente 8 años, en suelos que estaban antes cultivados con la variedad Catuaí, lo cual nos indica menor perturbación en los suelos con la variedad Catuaí. Por otra parte, los menores valores del  $q\text{CO}_2$  en los suelos con la variedad Caturra, sugieren que en estos suelos puede haber un uso más eficiente del C por la comunidad microbiana, tal vez favorecido por los menores valores de pH hallados en esos suelos. Esto es importante puesto que menor C del suelo será liberado como  $\text{CO}_2$  y mayor C del suelo será almacenado como  $\text{C}_{\text{mic}}$ .

Valores de  $q\text{CO}_2$  entre 0,5–2,0  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  han sido reportados para suelos agrícolas y forestales europeos por Anderson (2003) y esta autora considera que valores por encima de 2,0  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  podrían ser considerados como críticos para suelos con pH neutro. Altos valores de  $q\text{CO}_2$  significarían condiciones desfavorables para los microorganismos debido a un mayor estrés metabólico (Anderson y Domsch, 1993).

Balota y Chaves (2011) hallaron valores de  $q\text{CO}_2$  que variaron entre 0,16 y 0,31  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en el suelo bajo el dosel del café, y entre 0,17 y 0,22  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en el suelo entre surcos (calles), en cultivos de café bajo sombra de diferentes cultivos de leguminosas. Estos valores son menores a los hallados en nuestro estudio, lo cual podría estar relacionado con la diferencia en el método utilizado por estos autores para determinar el C de la biomasa microbiana (fumigación extracción) y con el tipo y manejo de las leguminosas de cobertura. Balota y Chaves (2011) explican estos valores, con base en lo antes discutido por Islam y Weil (2000), quienes sugieren que las prácticas de manejo que permiten la acumulación de residuos de plantas sobre la superficie del suelo, estimulan dominancia fúngica en la microbiota y los hongos asimilan cerca del 44% del C fácilmente disponible mientras que las bacterias asimilan alrededor del 32%. Por lo tanto las comunidades bacterianas son menos eficientes en transformar C del sustrato a C celular, comparadas con las comunidades fúngicas.

Alfaro (2004) reporta menores valores de  $q\text{CO}_2$  que los de este trabajo en sistemas agroforestales con café los cuales variaron entre 0,81 a 1,81  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en suelos francos y arcillosos respectivamente, en época lluviosa, y entre 0,37 a 1,36  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en suelos arcillosos y francos respectivamente en época seca, lo cual nos indica que la textura y la época climática influyen sobre la variación de los valores obtenidos para el  $q\text{CO}_2$  en esos suelos. Mientras que Pimentel et al. (2006) en café bajo manejo orgánico encontró variación entre 9,73  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en verano a 5,3  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  en otoño y siendo 6,96  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  el valor promedio para las cuatro épocas de muestreo; por otra parte, los cálculos realizados a partir de los datos publicados por Souza et al. (2012) no mostraron variaciones al comparar sistemas de café bajo sombra y sin sombra, valor promedio 0,66  $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ .



**Figura 3.5** Fluctuación estacional del  $qCO_2$  para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Glaeser et al. (2010) obtuvieron en sistemas de café bajo manejo orgánico para el  $qCO_2$  valores promedios de  $2,36 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{mic} \text{ h}^{-1}$  para la época seca (agosto) y de  $6,56 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{mic} \text{ h}^{-1}$  para la época de lluvia (abril); lo cual indica que en la época de lluvia la comunidad microbiana estuvo más estresada ya que respiró más por unidad de biomasa. Los autores relacionan niveles más elevados de CBM con índices de precipitación más bajos, tal vez asociado a algún tipo de estrés ambiental por exceso de agua durante los períodos más lluviosos.

Almeida et al. (2007) encontraron que un cafetal bajo manejo agroforestal poseía un  $qCO_2$  de  $7,51 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{mic} \text{ h}^{-1}$  y otro bajo plena exposición solar de  $17,69 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{mic} \text{ h}^{-1}$ ; estos autores sugieren que en la parcela a plena exposición solar la biomasa microbiana era menos eficiente; valores mayores a los hallados en este estudio.

Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles

nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción), donde, en la capa superficial (0 – 10 cm), reportaron los menores valores de  $q\text{CO}_2$  en el control ( $97,4 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ ) y mayores valores en el bosque nativo ( $166 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ ), estos valores son extremadamente altos comparados con los encontrados en nuestro estudio y con la mayoría de estudios reportados en la literatura. Los mismos autores discuten que altos valores de  $q\text{CO}_2$  indican mayores condiciones de estrés, mayores pérdidas de  $\text{CO}_2$  por unidad de biomasa microbiana y que las mayores pérdidas de  $\text{CO}_2$  podrían estar asociadas a mayores contenidos de COT; así un mayor suministro de MOS podría favorecer mayor población de bacterias, las cuales atacan rápidamente los sustratos orgánicos y aceleran los procesos de oxidación biológica. Desde otro punto de vista, Balota y Chaves (2011) basándose en lo discutido por Islam y Weil, (2000) discuten sobre menores valores de  $q\text{CO}_2$  sugiriendo que la dominancia fúngica aprovecha mejor el C fácilmente disponible que las bacterias. Por otra parte, también en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, encontrando en la capa superficial (0 – 10 cm), mayores valores de  $q\text{CO}_2$  en el sistema de manejo intercalado con *Brachiaria decumbens* ( $32 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ ), y los menores valores en el sistema intercalado con *Arachis pintoi* ( $15 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$ ). Estos valores son altos comparados con los encontrados en nuestro estudio.

Mientras que en suelos cafetaleros de Venezuela, Paolini (2015) encontró variaciones desde  $5,3 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  bajo manejo tradicional;  $7,91 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  bajo manejo orgánico a  $9,56 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}} \text{ h}^{-1}$  bajo manejo convencional, valores un poco más altos que los encontrados en nuestra investigación.

Mayores tasas de  $q\text{CO}_2$  se han observado en sistemas de manejo convencional cuando se comparan con sistemas de manejo orgánico, indicando menor calidad del suelo bajo sistema convencional (Pimentel, 2001; Fließbach y Mäder 2000; Partelli et al., 2012; Maluche-Baretta et al., 2007, en arboles de pera; Oberson et al., 2007 en soya). La perturbación del suelo ocasionada por el uso de maquinaria y agroquímicos, reduce el  $\text{C}_{\text{mic}}$ ,

aumenta la actividad microbiana y el  $q\text{CO}_2$  (Perucci et al., 2000; Balota et al., 2004; Das et al., 2007).

El  $q\text{CO}_2$  correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con las siguientes variables predictivas: Rbas ( $r = 0,727$ ); ureasa ( $r = 0,314$ ); Pasim ( $r = 0,437$ ); PT ( $r = 0,338$ ); NT ( $r = 0,337$ ). También correlacionó significativa pero negativamente con la  $\beta$ -glu ( $r = -0,318$ ); %limo ( $r = -0,448$ ) y %Hum ( $r = -0,304$ ) (Anexo II).

#### **3.6.4 Cociente Microbiano ( $q\text{Mic} \%$ ): $(C_{\text{mic}}/C_{\text{org}})*100$**

La relación  $q\text{Mic}$  integra las propiedades del suelo en relación al grado de colonización microbiana. Altos valores del  $q\text{Mic}$  de un suelo determinado indica que ese suelo favorece el metabolismo energético y el establecimiento de más microorganismos (Dilly, 2005), en otros términos, significa mejor calidad del suelo y mayor eficiencia de las comunidades microbianas en el uso del C de la materia orgánica del suelo (Maluche-Baretta et al., 2007).

El análisis PERMANOVA aplicado a los valores obtenidos para esta constante eco-fisiológica muestra diferencias significativas por la influencia de las variedades (Tabla 3.2 y Fig. 3.6), no se observan diferencias significativas por estacionalidad climática. El PERMDISP nos indica que no hubo dispersión significativa de los datos, por lo tanto las diferencias significativas encontradas entre variedades se pueden considerar intrínsecas al tipo de variedad e independientes de la estacionalidad climática. Los mayores valores se encontraron en los suelos con la variedad Caturra (Tabla 3.2).

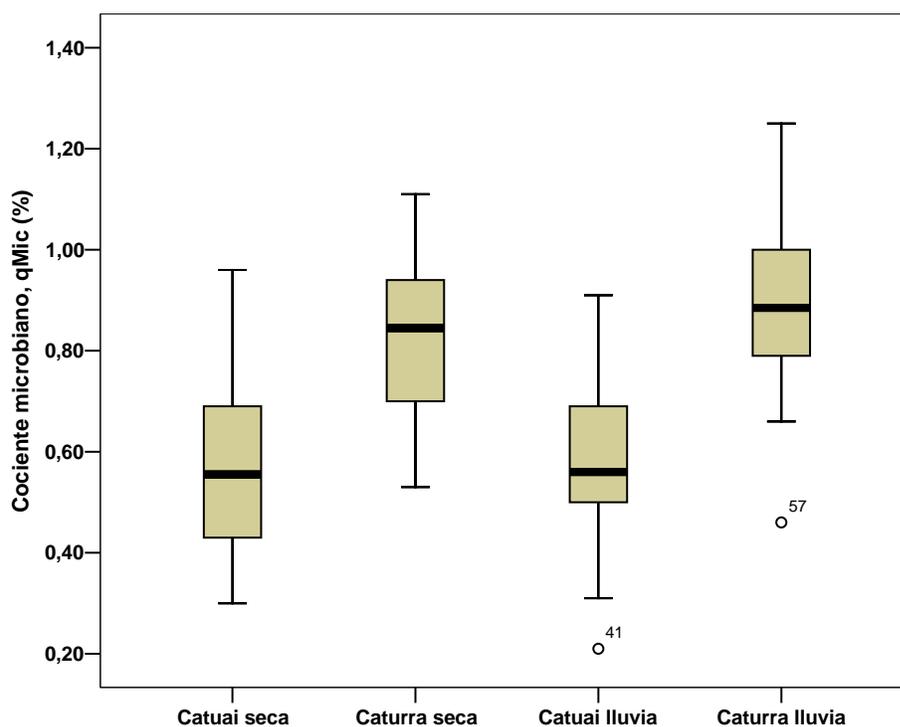
Los valores de  $q\text{Mic}$  calculados en este estudio son mucho menores a los reportados en la literatura, estos resultados posiblemente se deben al alto valor de los contenidos de COT, los cuales variaron entre 42,1 y 58,7  $\text{gC kg}^{-1}$  (Tabla 3.2). Además, es posible que el método usado de SIR que de alguna manera determina el CBM activa, así como la determinación parcial de COT por el método de combustión húmeda sin calentamiento

podieron influir en los resultados, teniendo en cuenta que en muchas de las investigaciones reportadas utilizan el método de fumigación extracción de acuerdo con Vance et al. (1987). Por otra parte, no se encontró diferencias significativas para los valores del  $C_{mic}$ , ni entre variedades ni por estacionalidad, sin embargo se observa la tendencia de los valores más altos del  $C_{mic}$  en los suelos con la variedad Caturra (Tabla 3.2 y Fig. 3.4). Mientras que los valores obtenidos para el COT son significativamente mayores en los suelos con la variedad Catuaí (Tabla 3.2), por esta razón, el  $qMic$  es significativamente mayor en los suelos con la variedad Caturra (Tabla 3.2). Estos resultados nos indica que las comunidades microbianas en los suelos con la variedad Caturra son más eficientes en fijar mayor proporción de C entrante en  $C_{mic}$ , como ha sido discutido por varios autores, como Anderson y Domsh, (1986; 1989); Jenkinson y Ladd, (1981); Balota et al. (2004); Dilly, (2005); Maluche-Baretta et al. (2007); Balota y Chaves, (2011). Es probable que los mayores valores de  $qMic$  hallados en los suelos cultivados con la variedad Caturra estén relacionados con mayores valores de pH en estos suelos, condición que puede favorecer un mayor desarrollo de la biomasa microbiana.

La relación  $qMic$ , puede ser un reflejo de las entradas anuales de C a la biomasa microbiana, a partir de la MOS que ha entrado al suelo en años anteriores (Anderson y Domsh, 1986).

Partelli et al. (2012) encontraron que el cociente microbiano ( $qMic$ ) fue mayor bajo suelos de bosque y sistemas de manejo orgánico con café comparados con suelos de café bajo manejo convencional, dichos valores variaron de 1,9% a 2% en verano y entre 0,8 y 1% en invierno. En otros estudios, Alfaro (2004), reporta valores que variaron entre 1,4% y 3,4 % en sistemas agroforestales con café para suelos arcillosos y franco arenosos respectivamente. Esta autora relaciona menores valores en suelos arcillosos con mayor cantidad de humedad al final de la época lluviosa, así como también a menor calidad del sustrato o materia orgánica. Pimentel et al. (2006) en café reportan variaciones entre 1% en verano y 2,8% en otoño. Mientras que a partir de los datos de Souza et al. (2012) quienes compararon suelos bajo café con sombra y café sin sombra, no se encontró variaciones, el valor calculado fue 1,3%. Estos valores son mayores a los encontrados en nuestro estudio.

Notaro et al. (2014) en la región semiárida de Pernambuco - Brasil, compararon un sistema agroforestal; un sistema biodinámico (café con sombra de árboles frutales y árboles nativos); bosque nativo y un control (plantación de café abandonada hacía 15 años, aún con plantas en producción), donde encontraron los menores valores de qMic en el sistema biodinámico (1%) y mayores valores en el control (2,3%), valores mayores a los encontrados en este estudio. Mientras que también en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, encontrando en la capa superficial (0 – 10 cm), mayores valores de qMic (calculado) en el sistema intercalado con *Arachis pintoi* (3,5%) y menores valores en los sistemas de manejo orgánico y el sistema intercalado con *Brachiaria decumbens* (1,7% y 1,6% respectivamente). Estos valores son mayores a los encontrados en nuestro estudio, pero concuerdan por el hecho de mostrar los menores valores en los sistemas donde hay mayor COT.



**Figura 3.6** Fluctuación estacional del qMic para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Nuestros hallazgos concuerdan con los valores encontrados por Paolini (2015) quien encontró en suelos cafetaleros del estado Mérida variaciones desde 0,7% en café bajo manejo convencional, 0,9% bajo manejo orgánico y 1,4% bajo manejo tradicional.

Balota y Chaves (2011) trabajando en suelos cultivados con café, bajo aplicación de abonos verdes de diferentes leguminosas, reportan valores para el qMic que variaron entre 1,26 a 3,35% bajo el dosel del café y de 2,4 a 4,0% en los callejones. Valores también mayores a los encontrados en este estudio.

Nunes et al. (2009) observaron menores valores del  $C_{mic}$  en sistemas de monocultivos con café comparados con sistemas de bosque, reportando una disminución drástica del qMic sobre todo en los períodos más secos (abril y julio; 0,7-0,8 %), sugiriendo que ese efecto puede estar asociado al estrés hídrico enfrentado por los microorganismos, el cual los limita para el uso del COT y se disminuye la relación  $C_{mic}/COT$ . Mientras que en los períodos lluviosos (octubre a marzo; 1,0-1,3 %), se estimula la actividad microbiana. Marchiori Junior y Melo, (2000) comparo el qMic de oxisoles bajo bosque nativo sometidos a diferentes formas de manejo agrícola (maíz, caña de azúcar y café) obteniendo 0,8 % bajo el dosel del cafeto y de 1,7% en los callejones. El bosque natural presento un valor de 1,1 %.

El qMic, correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con las siguientes variables predictivas:  $C_{mic}$  ( $r = 0,701$ ); pH ( $r = 0,371$ ); DA ( $r = 0,319$ ); %limo ( $r = 0,324$ ) y correlacionó significativa pero negativamente con  $qCO_2$  ( $r = -0,412$ ); Pasim ( $r = -0,389$ ); PT ( $r = -0,345$ ); NT ( $r = -0,311$ ); COT ( $r = -0,678$ ); Al+H ( $r = -0,377$ ) y %arena ( $r = -0,364$ ). (Anexo II).

### **3.6.5. Cociente de Eficiencia Metabólica ( $qCO_2C^{-1}_{org}$ ):**

$$[(mgC-CO_2 * g^{-1} C_{mic} h^{-1}) / (gC_{org} * g^{-1} ss)]$$

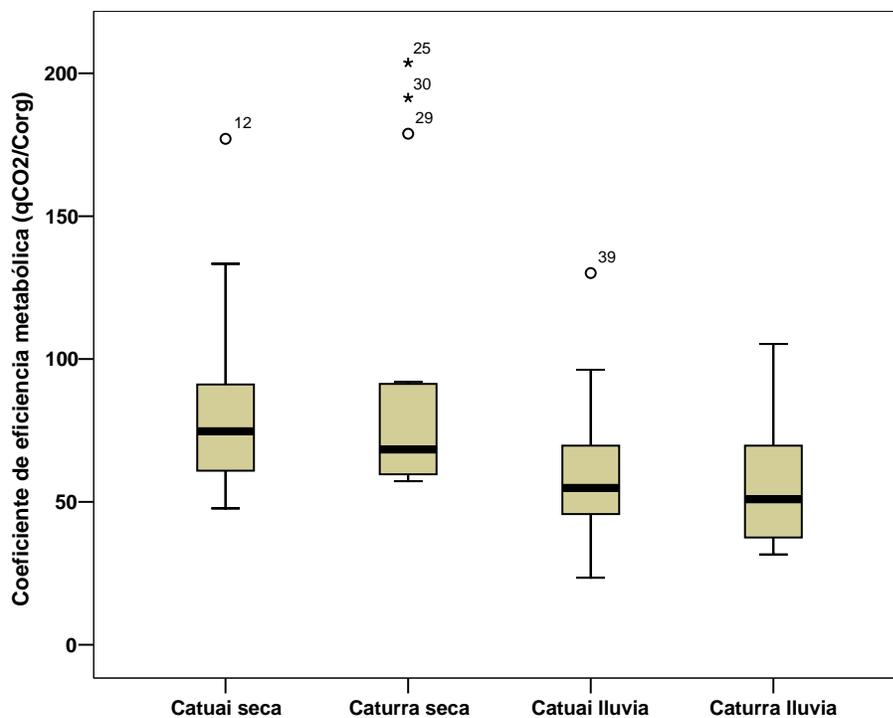
El cociente de eficiencia metabólica ( $qCO_2C^{-1}_{org}$ ) es una constante ecofisiológica que refleja la eficiencia metabólica de los microorganismos del suelo para obtener energía a

partir de los sustratos energéticos en los ecosistemas (Dilly et al., 2001; Dilly, 2005). La relación  $q\text{CO}_2\text{C}^{-1}_{\text{org}}$  se refiere a la interrelación entre el uso eficiente del C y la calidad de la materia orgánica disponible en el suelo (Dilly et al., 2001).

La Tabla 3.2 muestra los resultados del PERMANOVA Y PERMDISP, se observa variación estacional significativa ( $p < 0,001$ ), mostrando los menores valores durante la estación lluviosa para ambos suelos (Fig. 3.7), lo que nos indica un uso más eficiente del carbono en esa época climática (Dilly et al., 2001; Dilly, 2005) y a su vez, un estado eco-fisiológico más estable (Dilly, 2005). El PERMDISP, nos indica que hubo dispersión multivariada significativa en la estacionalidad climática (Tabla 3.2), por lo tanto la variación estadística encontrada en la estacionalidad, no es intrínseca a este factor.

Un análisis detallado de los resultados del PERMANOVA para  $q\text{CO}_2\text{C}^{-1}_{\text{org}}$  (Tabla 3.2) nos muestra la gran importancia de esta constante ecofisiológica para estudiar y expresar la eficiencia metabólica energética de la microbiota en el uso de los sustratos fuentes de energía del suelo. Como se observa en la Tabla 3.2 y Fig. 3.7, los resultados del PERMANOVA para  $q\text{CO}_2/\text{C}_{\text{org}}$  nos permite sugerir que la microbiota del suelo es metabólicamente más eficiente en el uso de los sustratos energéticos durante la estación lluviosa, favorecida por el contenido de humedad del suelo (menor estrés por sequía).

El  $q\text{CO}_2\text{C}^{-1}_{\text{org}}$  correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con: Rbas ( $r = 0,599$ ) y  $q\text{CO}_2$  ( $r = 0,872$ ). También correlacionó significativa pero negativamente con el  $\text{C}_{\text{mic}}$ , ( $r = -0,366$ );  $\beta\text{glu}$  ( $r = -0,311$ ); COT ( $r = -0,303$ ); %Hum ( $r = -0,350$ ) y %limo ( $r = 0,317$ ). (Anexo II).



**Figura 3.7** Fluctuación estacional del Coeficiente de eficiencia metabólico ( $qCO_2 C^{-1}_{org}$ ) para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Los valores encontrados en nuestro estudio están dentro del rango de valores hallados en suelos cafetaleros de los estados Mérida y Trujillo, por Paolini (2015) quien encontró valores de 123 en suelos bajo manejo orgánico, 339 bajo manejo tradicional; 180 bajo manejo convencional; 71,42 bajo manejo tradicional con Caturra y 70,65 ( $mgC-CO_2 * g^{-1} C_{mich}^{-1}) / (gC * g^{-1})$  bajo manejo tradicional con Catuaí.

### 3.7. CONCLUSIONES

Los mayores valores de respiración basal se observaron en la estación climática seca para ambas variedades de café, lo cual puede estar asociado a un aumento de la actividad metabólica de la microbiota favorecida por mejor aireación del suelo, como también se podría considerar que un suelo seco o con poca humedad cuando en el laboratorio se lleva a condiciones óptimas del 60% de su capacidad de retención de humedad los microorganismos tienen un mayor acceso a los sustratos y se dispara su actividad respiratoria basal. Así mismo pudo estar influenciada por factores de estrés ocasionados la disminución del contenido de agua en el suelo y por las variaciones del pH, el cual fue significativamente menor en los suelos cultivados con la variedad Catuaí, comparados con los valores de pH obtenidos para suelos con la variedad Caturra.

Cociente metabólico ( $qCO_2$ ) resultó sensiblemente apropiado para evaluar la calidad del suelo y sensible a los cambios por la época climática y variedad de café sembrada en los suelos estudiados. El  $qCO_2$  fue mayor en los suelos cultivados con la variedad catuá y en la época seca, resultados que pueden estar asociados a valores superiores de actividad microbiana ( $R_{bas}$ ), la cual a su vez puede ser promovida por los mayores contenidos de COT en los suelos con la variedad Catuaí y a un aumento de la actividad metabólica de la microbiota, favorecido por mejor aireación del suelo, así como también a factores de estrés ocasionados por las variaciones del pH, el cual fue significativamente menor en los suelos cultivados con la variedad Catuaí, comparados con los valores de pH obtenidos para suelos con la variedad Caturra.

El cociente microbiano ( $qMic$ ) mostró sensibilidad a los cambios por el tipo de variedad cultivada. Los mayores valores se observaron en los suelos con la variedad Caturra, hallazgos posiblemente relacionados a mayores contenidos de COT en los suelos con la variedad Catuaí, mientras que para el  $Cmic$  se encontró tendencia de mayores valores en los suelos con la variedad Caturra. Es posible que los mayores valores de  $qMic$  hallados en los suelos cultivados con la variedad Caturra estén asociados con mayores valores de pH en estos suelos, condición que puede favorecer un mayor desarrollo de la biomasa microbiana.

Los resultados obtenidos para el cociente de eficiencia metabólica ( $q\text{CO}_2\text{C}^{-1}_{\text{org}}$ ) nos permite sugerir que la microbiota del suelo fue metabólicamente más eficiente en el uso de los sustratos energéticos durante la estación lluviosa, favorecida por el contenido de humedad del suelo (menor estrés por sequía).

## CAPITULO IV

### FLUCTUACIÓN TEMPORAL Y EFECTO DE LA VARIEDAD DE CAFÉ SOBRE LAS ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS COMO INDICADORAS DE CALIDAD DEL SUELO, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

Procesos fundamentales para la funcionalidad de los suelos como mineralización y humificación de la MOS, a su vez determinantes de otros procesos donde intervienen elementos claves como C, N, P y S, son realizados por los microorganismos del suelo y dependen de su actividad metabólica. La monitorización de los parámetros bioquímicos, como las actividades enzimáticas y los relacionados con la biomasa microbiana pueden ser relevantes en el estudio de la calidad y funcionalidad de los suelos naturales y los suelos relacionados con sistemas agrícolas tradicionales y/o los sistemas de manejo ecológico y sostenible (Canet et al., 2000; García y Hernández, 2000; García et al., 2003). Las actividades de las enzimas del suelo se han sugerido como indicadores adecuados de la calidad del suelo debido a que: a) son medidas de la actividad microbiana del suelo y por lo tanto están estrictamente relacionadas con las transformaciones y ciclos de nutrientes; b) pueden responder rápidamente a cambios en el suelo causados por factores naturales y/o antrópicos y c) son fáciles de medir (Bandick y Dick, 1999; Nannipieri et al., 2002; Puglisi et al., 2006). Por su uso como indicadores de la calidad del suelo, las enzimas se pueden clasificar en tres áreas: a) indicadores de la contaminación; b) indicadores de la perturbación de los ecosistemas y c) indicadores de las prácticas agrícolas (Karaca et al., 2011).

Las propiedades biológicas y bioquímicas del suelo son muy sensibles a las perturbaciones ambientales, y a los cambios de manejo y uso del suelo, con una respuesta rápida a dichos cambios, lo que las convierte en indicadores idóneos del impacto de un determinado manejo sobre el ecosistema (Dick, 1992; Doran y Parkin, 1994). El estudio de distintas actividades enzimáticas junto con otras variables bioquímicas ha sido utilizado en la obtención de índices de calidad del suelo, por su alta sensibilidad y rápida respuesta a las

perturbaciones (Bastida et al., 2008; Trasar-Cépeda et al., 1998). Son abundantes los trabajos en los que mediante el estudio de la actividad enzimática se evalúan los efectos de las prácticas de conservación (mínimo laboreo, rotación de cultivos, adición de enmiendas orgánicas, etc.) aplicados a los sistemas agrícolas (Dick, 1992; Marinari et al., 2006; Pajares et al., 2011).

En este capítulo estudiaremos las actividades enzimáticas como indicadoras de la calidad del suelo, su fluctuación estacional y el efecto de la variedad de café establecida, así como sus interrelaciones entre sí y con los parámetros microbiológicos y físico-químicos estudiados en los capítulos II y III.

## **4.2. GENERALIDADES SOBRE ENZIMAS DEL SUELO**

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica producidas por los seres vivos y que se encargan de acelerar reacciones químicas o hacer posible aquellas reacciones que de otra manera no se producirían. Las investigaciones sobre el origen, producción, estabilización y persistencia de las enzimas del suelo y sobre el papel de las actividades enzimáticas en los sistemas suelo-planta constituyeron el más importante desarrollo en la enzimología del suelo (Burns, 1972). Las actividades enzimáticas del suelo más estudiadas son las hidrolasas como polisacaridasas, ureasas, fosfatasas, sulfatasas (Nannipieri et al., 2012) y oxidorreductasas (deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas); menos estudiadas las transferasas y liasas (García et al., 2003; Karaca et al., 2011). Otro factor importante para el desarrollo de la enzimología del suelo es que su estudio está basado en experimentos simples, precisos, baratos y generalmente basados en incubaciones de laboratorio a corto plazo (Nannipieri et al., 2012). Una parte de las enzimas del suelo son extracelulares (fuera del organismo), liberadas durante el metabolismo y muerte celular, generalmente de vida media corta como enzimas libres; otras son intracelulares o endocelulares (Karaca et al., 2011), formando parte de la biomasa microbiana (Fig. 3.1), así por ejemplo la fosfatasa es una enzima extracelular mientras que la deshidrogenasa es un enzima intracelular. Por último, existen las enzimas inmovilizadas que pueden mantener un nivel constante y estable de

actividad enzimática en el suelo, independiente de la proliferación microbiana y de las formas usuales de regulación de la síntesis y secreción de enzimas. Este tipo de enzimas inmovilizadas pueden permanecer unidas a coloides minerales (como las arcillas) u orgánicos (como sustancias húmicas), el cual es un mecanismo para su estabilización y protección del ataque microbiano (Karaca et al., 2011; Nannipieri et al., 1996), con lo cual son muy resistentes a los procesos de desnaturalización, y por consiguiente la extracción de las enzimas del suelo es difícil y es por ello que se estudian indirectamente midiendo su actividad (Paolini, 2011; Karaca et al., 2011; Nannipieri et al., 2002; García et al., 2003). La medición de la actividad enzimática en suelos dependerá de las enzimas activas las cuales como hemos visto tienen diferente localización y diferente origen (Fig. 4.1) (vegetal, animal y microbiano), con multitud de especies de microorganismos como potenciales contribuyentes (Skujins, 1967; Tabatabai, 1994; Dick, 1997; Dick y Burns, 2011; Nannipieri et al., 2002; Karaca et al., 2011; Paolini, 2011; Nannipieri et al., 2012). La evaluación de la actividad de una determinada enzima en diferentes períodos estacionales pueden constituir un mecanismo para evaluar la fertilidad de un suelo y/o el estado de su actividad biológica (Melo et al., 2013).

El protocolo clásico utilizado para establecer un ensayo sobre enzimas del suelo incluye: (a) la determinación de los cambios en la concentración de los productos de reacción o del sustrato; (b) el uso de un eficiente protocolo de extracción de los sustratos o productos, del suelo; (c) elección del buffer; (d) el monitoreo del efecto de los valores de pH sobre la actividad de las enzimas; (e) el estudio del efecto de la temperatura y el tiempo de incubación sobre la actividad enzimática; (f) el estudio del efecto de las diferentes cantidades de suelo sobre la actividad enzimática; (g) el estudio del efecto de las concentraciones del sustrato y del producto final sobre la actividad enzimática; y (h) la elección del control adecuado. Ensayos de incubaciones cortas (pocas horas) generalmente son preferidos a ensayos con incubaciones largas, para evitar el crecimiento microbiano y la transformación de los productos de reacción (Nannipieri et al., 2012). Usualmente es preferible condiciones de agitación, porque ello permite un mejor contacto entre la enzima y el sustrato. Además los ensayos con enzimas deben ser evaluados y validados en varios tipos de suelos con un amplio espectro de propiedades (Dick, 2011; Gianfreda y Ruggiero, 2006; Tabatabai, 1994). Tanto

las enzimas intracelulares como las extracelulares estabilizadas del suelo están presentes en sistemas heterogéneos y pueden afectar la cinética enzimática. Las células microbianas y las enzimas extracelulares son adsorbidas sobre las superficies reactivas de las partículas del suelo o atrapadas en los constituyentes del suelo como las sustancias húmicas (Nannipieri et al., 2012). La actividad de las enzimas extracelulares libres y de las enzimas de las células muertas son consideradas de vida corta y su contribución a la medida de la actividad enzimática se supone cuantitativamente poco importante (Nannipieri et al., 2012). Hasta la fecha no existen métodos capaces de distinguir entre la actividad de las enzimas extracelulares estabilizadas con respecto a las enzimas asociadas a las células activas (Nannipieri et al., 2012) aunque se han hecho algunos experimentos para tratar de responder a dicha pregunta (Klose y Tabatabai, 1999). La actividad de las enzimas extracelulares estabilizadas puede persistir en el suelo aún bajo condiciones desfavorables para los microorganismos, por lo cual no se consideran asociadas a la actividad microbiana existente al momento del ensayo (Nannipieri, 2002; Karaca et al., 2011). La actividad enzimática es un término usado para referirse al amplio rango de actividades llevadas a cabo por la gran diversidad de enzimas en el suelo.

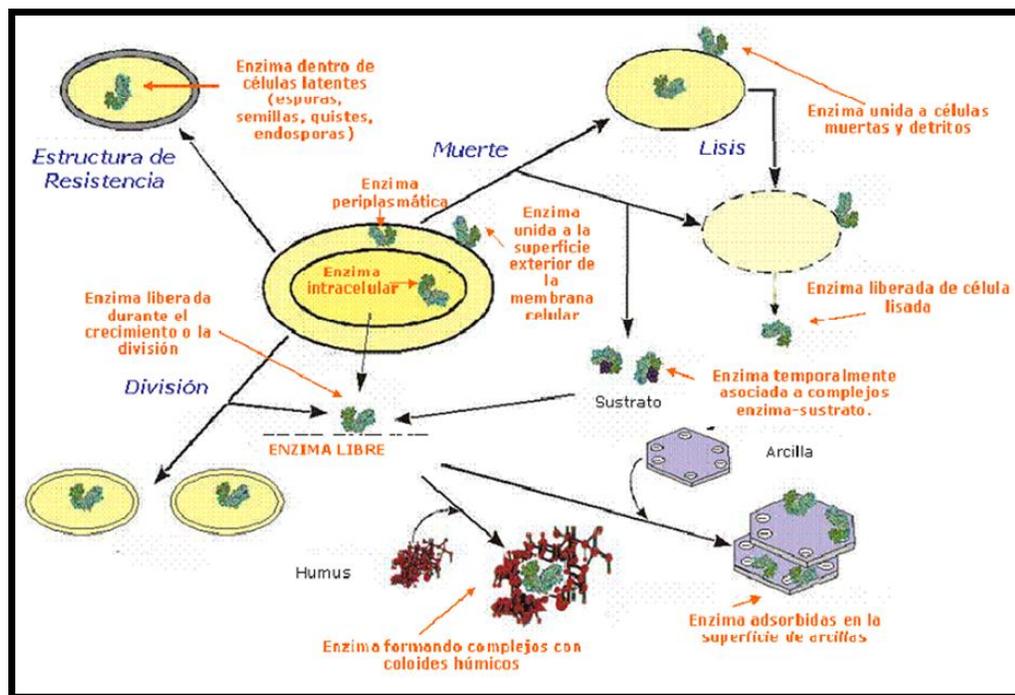


Figura 4.1 Localización y estados de las enzimas del suelo (Burns, 1982; Klose, 2003 y Ochoa et al., 2007).

**Tabla 4.1** Enzimas del suelo, clasificación y su función ecológica (Skujins, 1967; Dick, 1997).

Enzima/clasificación	Función ecológica
<b>A. Oxidoreductasas</b>	
Deshidrogenasas	Existen como parte integral de células intactas y refleja la actividad oxidativa total de la microbiota del suelo. Importante en la oxidación de la materia orgánica.
Glucosa oxidasa	Oxida la glucosa.
Catalasa, peroxidasa	Libera oxígeno del peróxido de hidrógeno.
Polifenol oxidasas	Oxida los compuestos fenólicos y participa en el proceso de humificación.
<b>B. Hidrolasas</b>	
Fosfatasas (mono y diéster)	Liberan fosfato disponible para las plantas a partir de la materia orgánica.
$\alpha$ y $\beta$ -amilasas	$\alpha$ -amilasas, hidrolizan $\alpha$ -1,4-glucosídicos; $\beta$ -amilasas liberan unidades de maltosa, desde extremos no- reductores de cadenas de polisacáridos.
Celulasas	Producidas por hongos y bacterias, para liberar glucosa, a partir de la endohidrólisis del enlace $\beta$ -1,4 glucosídico en la celulosa.
$\beta$ -glucosidasas (Celobiasas)	Liberan glucosa, una importante fuente de energía para la actividad microbiana, a partir de $\beta$ -glucosidos.
Ureasa (amidohidrolasa)	Hidrólisis de enlaces C-N de la urea a amonio y anhídrido carbónico.
Proteasas	Hidrolizan proteínas liberando aminoácidos; importante en el ciclo del N y en su mineralización
Peptidasas	Hidrolizan dipéptidos, liberando dos aminoácidos relacionado con el ciclo y la mineralización del N.
Amidasas	Hidrolizan enlaces C-N de amidas liberando $\text{NH}_3$ . Importante en la mineralización del N al proveer formas de N disponible para las plantas.
Arilsulfatasas	Mineralización del azufre de la materia orgánica, liberando sulfato.
Lipasas	Hidrolizan los lípidos a ácidos grasos
Invertasas (sacarosas, sucrasas).	Hidrolizan la sacarosa a glucosa y fructosa, y así provee energía para la actividad microbiana.
Asparaginasa, glutaminasa	Actúa sobre los enlaces C-N diferentes a los enlaces peptídicos liberando $\text{NH}_3$ , el cual es importante en la mineralización del N para proveer disponibilidad de éste para las plantas.
<b>3. Transferasas</b>	
Tiosulfato S-transferasa (rodanasa)	Ejecuta un paso intermediario en la oxidación del S elemental, que está en pequeñas cantidades en el suelo o se añade como S en los fertilizantes.
<b>4. Liasas</b>	
Glutamato-descarboxilasa	Hidroliza el ácido aspártico.
L-histidina amonio liasa	Desamina la histidina, involucrada en la mineralización del N.
Tirosina descarboxilasa	Hidroliza la tirosina, un producto de la actividad de la proteasa. Está involucrada en la mineralización del N.
Ensayos enzimáticos de amplio espectro.	
Hidrólisis del diacetato de fluoresceína	Indicador del potencial general de actividad microbiana del suelo al determinar la contribución de las enzimas relacionadas con la degradación de la MOS, tales como esterases, proteasas y lipasas.

Las actividades enzimáticas, muestran correlaciones significativas con el contenido de materia orgánica del suelo (C soluble en agua y COT) (Madejón et al., 2007). Las enzimas del suelo son poderosas herramientas para aplicar a la evaluación de los cambios a corto y largo plazo que ocurren en el sistema suelo. La mayoría de los factores antrópicos y

ambientales que afectan la calidad del suelo se pueden direccionar a cambios en las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, que al mismo tiempo provocan cambios en el pool de las enzimas del suelo, como indicadores de la calidad del suelo, lo cual significa que los parámetros de calidad del suelo en general, están relacionados entre sí (Karaca et al., 2011).

Las prácticas agrícolas, como, aplicación de enmiendas orgánicas, riego, fertilización, y labranza modifican los procesos de agregación, reciclaje de nutrientes y actividades biológicas del suelo, modificando la producción de enzimas del suelo. La agregación de las partículas minerales del suelo, es uno de los procesos más importantes del suelo, que se sabe se desarrolla posteriormente a las actividades biológicas – bioquímicas. Los procesos de agregación y desagregación son eventos a largo plazo, en contraste con los cambios en las condiciones microbiológicas – bioquímicas que son rápidos y ocurren en un corto espacio de tiempo (Karaca et al., 2011).

Las enzimas estabilizadas en el suelo han manifestado resistencia a varios cambios ambientales, tales como cambios en la temperatura y humedad del suelo. La temperatura de inactivación de las enzimas estabilizadas es alrededor de 10°C mayor que cuando están en estado puro. Fluctuaciones en la humedad inducen ciertos cambios limitados en el contenido de las enzimas del suelo, pero generalmente las variaciones en la actividad enzimática por la estacionalidad son bajas y generalmente no se correlacionan con cambios en el número de microorganismos (Skujins, 1976).

Se han realizado algunos estudios de correlación entre varias enzimas del suelo bajo diferentes comunidades vegetales (Berger-Landefeldt, 1965 y Franz, 1973 citados por Skujins, 1976). Franz (1976) determinó número de bacterias, liberación de CO<sub>2</sub>, deshidrogenasa, proteasa, ureasa, catalasa y β-glucosidasa en una amplia variedad de suelos y concluyó que en los primeros 20 cm de suelos naturales no cultivados se observan las mayores actividades. La actividad de la deshidrogenasa correlacionaba ligeramente con el número de bacterias y las actividades de la β-glucosidasa, proteinasa, ureasa y catalasa correlacionaban bastante bien con el contenido de materia orgánica del suelo. Este autor

concluyó que la actividad de una sola enzima no podía ser usada para la determinación de la actividad biológica o la fertilidad del suelo.

#### **4.3. ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Una de las principales diferencias entre las prácticas de manejo del suelo en sistemas de cultivo convencional y ecológico radica, junto con el laboreo, en la fertilización. Mientras que la reposición de nutrientes en la agricultura convencional se realiza con la aplicación directa de nutrientes fácilmente disponibles (fertilizantes de origen sintético), en la ecológica es a través de sustratos orgánicos de origen animal o vegetal (Ochoa et al., 2007). Por otra parte los microorganismos se inhiben, se suprime la síntesis de enzimas y estas a su vez se inhiben directamente en presencia de excesos de insumos agrícolas, como fertilizantes (González-Prieto y Caballas, 1995; Olander y Vitousek, 2000; Ochoa et al., 2007), y plaguicidas (Paolini et al., 2014; Mijangos et al., 2006; Benitez et al., 2006).

Las enzimas del suelo son importantes para el funcionamiento de los ecosistemas por su efecto catalítico sobre el ciclaje de los nutrientes y juegan un papel crucial en los ciclos del C ( $\beta$ -glucosidasa,  $\beta$ -galactosidasa,  $\alpha$ - y  $\beta$ -amilasas), del N (ureasa, proteasas), P (fosfatasas) y S (sulfatasas) (Karaca et al., 2011).

Generalmente los mayores valores de actividad enzimática han sido encontrados en sistemas de manejo agroecológicos o en aquellos sistemas de manejo amigables con el medio ambiente comparados con sistemas agrícolas convencionales (Skujins, 1976; Benitez et al., 2006; Mijangos et al., 2006; Madejón et al., 2007; Trasar-Cepeda et al., 2008b; Moeskops et al., 2010; Kujur et al., 2012; Elabed et al., 2014; Mondelli et al., 2014; Paolini, 2014). Por ejemplo, Paolini et al. (2014) compararon las actividades enzimáticas (deshidrogenasa, amonificación de arginina, hidrólisis del diacetato de fluoresceína, fosfatasa ácida,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa, proteasa benzoil argininamida y caseinasa) en suelos a nivel superficial (0-5 cm) de varias fincas cafetaleras en los estados Trujillo y Mérida bajo manejo tradicional,

convencional y orgánico, encontrando las mayores actividades enzimáticas en las fincas bajo manejo orgánico, y que la adición de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) afectan de forma negativa los valores de actividades enzimáticas en los cultivos bajo manejo convencional. Mijangos et al. (2006) reportaron en general, mayor actividad enzimática para la deshidrogenasa, arilsulfatasa y  $\beta$ -glucosidasa en parcelas con cero o mínima labranza, comparadas con aquellas de manejo convencional.

En un experimento en el que se aplicó siete enmiendas, incluyendo enmiendas orgánicas alternativas como aguas residuales de la fabricación de aceite de oliva, residuos del cultivo de champiñones y bagazo de café comparadas con un tratamiento de fertilización mineral convencional, se evaluó los indicadores bioquímicos de calidad del suelo (actividades enzimáticas:  $\beta$ -glucosidasa, fosfatasa alcalina, ureasa e hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA)), las microbiológicas ( $C_{mic}$ ,  $N_{mic}$ , respiración del suelo y  $qCO_2$ ). Las actividades de la  $\beta$ -glucosidasa y fosfatasa se redujeron significativamente mientras que las actividades de la ureasa y la hidrólisis del DAF mejoraron en todas las parcelas, independientemente del tipo de enmienda. Los resultados demostraron la eficiencia, alta sensibilidad y rápida respuesta de los indicadores bioquímicos en la evaluación de los cambios en la calidad del suelo (Mondelli et al., 2014).

#### **4.4. MATERIALES Y METODOS**

La descripción del sitio del experimento, el diseño experimental utilizado, así como toda la información sobre el muestreo del suelo, análisis de laboratorio y análisis estadístico se presentan en el capítulo II, secciones 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 y 2.3.5, respectivamente. El análisis de laboratorio para las propiedades bioquímicas se describe a continuación.

#### 4.4.1. Propiedades Bioquímicas

El análisis de laboratorio para los parámetros bioquímicos se realizó por medio de métodos estandarizados, así: parámetros bioquímicos generales (Tabla 4.2) y los parámetros bioquímicos específicos (Tabla 4.3).

**Tabla 4.2** Parámetros bioquímicos generales.

VARIABLE	MÉTODO	REFERENCIA
Deshidrogenasa (DH)	INT (2- <i>p</i> -iodofenil-3-nitrofenil-5-feniltetrazolio).	Camíña et al. (1998)
Hidrólisis del Diacetato de fluoresceína (DAF)	Medición de la actividad microbiana total usando el Diacetato de fluoresceína (hidrólisis de DAF).	Schnürer y Rosswall (1982)
Arginasa	Determinación del amonio liberado en la amonificación de arginina.	Alef y Kleiner (1986)

**Tabla 4.3** Parámetros bioquímicos específicos.

VARIABLE	MÉTODO	REFERENCIA
Fosfomonoesterasa ácida (P <sub>tsa</sub> )	Determinación del <i>p</i> -nitrofenol liberado a partir de la hidrólisis de <i>p</i> -nitrofenilfosfato	Tabatabai y Bremner (1969)
$\beta$ – Glucosidasa ( $\beta$ -glu)	Determinación del <i>p</i> -nitrofenol liberado a partir de la hidrólisis del <i>p</i> -nitrofenil- $\beta$ -D-glucopiranosido	Eivazi y Tabatabai (1988) y Tabatabai (1994)
ureasa (ureasa)	Determinación del amonio liberado a partir de la hidrólisis de la urea	Kandeler y Gerber (1988)
proteasa – caseinasa (casein)	Determinación de la tirosina liberada a partir de la hidrólisis de la caseína	Kandeler, E. (1995)

#### 4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.5.1. Actividad deshidrogenasa (DH): ( $\mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss}\cdot\text{h}^{-1}$ )

La DH es una oxidoreductasa intracelular que participa en los procesos de fosforilación oxidativa (reacciones metabólicas) de los microorganismos del suelo (Alef y Nannipieri, 1995; Schlöter et al., 2003), por la cual se ha considerado un buen indicador de las actividades oxidativas del suelo y en general de su actividad microbiológica (García et

al., 1993; Benitez et al., 2006; Stepniewska et al., 2007) y del estado metabólico de la microbiota (Taylor et al., 2002).

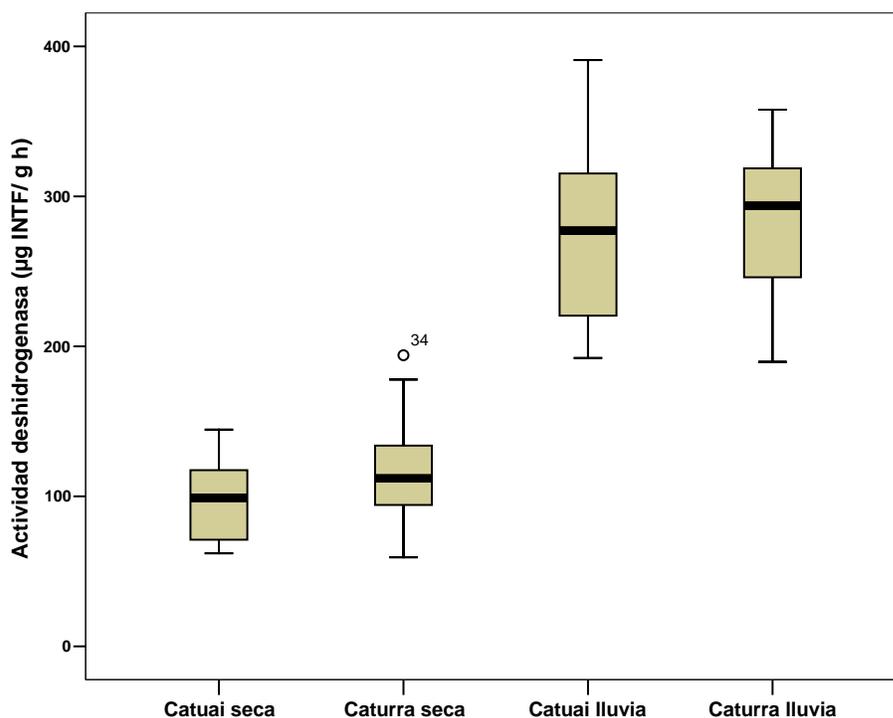
La actividad de la deshidrogenasa comúnmente se usa como un indicador de la actividad biológica del suelo (Burns, 1978). Esta enzima se considera existe como parte integral de las células intactas por lo cual no se acumula extracelularmente en el suelo. Se conoce que esta enzima oxida la materia orgánica transfiriendo protones y electrones de un sustrato a compuestos aceptores. Estos procesos son parte de la cadena respiratoria de los microorganismos del suelo (Alef, 1995).

El análisis PERMANOVA de los datos obtenidos para la actividad deshidrogenasa no mostró diferencias significativas entre las variedades de café, pero si se observa diferencia significativa ( $p < 0,001$ ) entre las dos épocas de muestreo, mostrando mayor actividad DH en la estación lluviosa, con alto nivel de dispersión ( $p < 0,001$ ) (Tabla 4.4 y Fig. 4.2).

El incremento de la actividad de la deshidrogenasa en la época de lluvia puede estar por un lado relacionada con el incremento de la humedad del suelo, que podría favorecer la proliferación de microorganismos anaeróbicos, los cuales a su vez producen deshidrogenasas (Orten y Neuhaus, 1970; Dick y Tabatabai, 1992; Baruah y Mishra, 1984; Brzezińska et al., 1998) y por otro lado a la caída de hojarasca en la época seca (Arellano et al., 2004; Aranguren et al., 1982) causada por el estrés hídrico y la acción mecánica de los vientos que causa una mayor disponibilidad de sustratos orgánicos, los cuales al descomponerse producen sustancias orgánicas solubles que percolan hacia los horizontes minerales superficiales en forma de carbono orgánico disuelto y son mineralizados rápidamente en la época de lluvia (Görres et al., 1998).

Quilchano y Marañon, 2002 estudiaron el efecto de la estacionalidad sobre la DH en los primeros 10 cm de suelos forestales en el Parque Los Alcornocales (Sur de España). Ellos encontraron que la DH de dichos suelos forestales en otoño (octubre) alcanzaba un valor promedio de  $248,37 \pm 77,46 \mu\text{g INTF g}^{-1} \text{ ss h}^{-1}$  y ésta doblaba al promedio de verano (julio) de  $136,20 \pm 44,47 \mu\text{g INTF g}^{-1} \text{ ss h}^{-1}$  en una de las parcelas estudiadas. Estos autores

explican dicho incremento con la mayor cantidad de humedad en otoño y también a un mayor aporte de restos orgánicos al suelo con el inicio de la caída de hojarasca. Los valores de ese estudio concuerdan con los hallados en este trabajo.



**Figura 4.2** Fluctuación estacional para la actividad de la Deshidrogenasa en suelos cafetaleros bajo dos variedades de café en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Uzcategui (2009) también investigó la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, encontrando mayores valores de DH en la estación lluvia (promedio 223,27  $\mu\text{g INTF g}^{-1}$  suelo  $\text{h}^{-1}$  con un intervalo de 82,6 a 463,03  $\mu\text{g INTF g}^{-1}$  ss  $\text{h}^{-1}$ ) y menores valores en la estación seca (promedio 125,13  $\mu\text{g INTF g}^{-1}$  ss  $\text{h}^{-1}$  e intervalo de 76,7 a 230  $\mu\text{g INTF g}^{-1}$  ss  $\text{h}^{-1}$ ). Estos valores coinciden con los hallados en el presente trabajo.

Hernández et al. (2003) estudiaron la variación estacional de la actividad de la deshidrogenasa en tres sistemas de labranza en un suelo Inceptisol durante un ciclo de maíz

(*Zea mays* L.) en Turén, estado Portuguesa y encontraron un incremento en la actividad de dicha enzima también asociado a un mayor contenido de humedad del suelo.

Trasar-Cepeda et al. (2008b) compararon sistemas de rotación de cultivos con suelos clímax (suelos naturales, bien conservados, desarrollados bajo vegetación clímax, considerados de máxima calidad y que sustentan ecosistemas maduros y estables) encontrando los mayores valores de DH ( $193,2 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ) en suelos clímax (bosque de roble) y menores en sistemas de rotación de cultivos ( $131,95 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ), los cuales están en el intervalo reportado en nuestra investigación.

Paolini et al. (2010) en suelos semiáridos del estado Falcón, compararon vegetación nativa con suelos cultivados, encontrando mayor DH bajo vegetación nativa y menor bajo cultivo de melón ( $87,9 - 22,3 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ), valores bastante bajos comparados con los que nosotros encontramos en suelos cafetaleros, resultados que pueden ser debido a los menores contenidos de COT y por ende menor actividad de la microbiota en los suelos semiáridos.

Henríquez et al. (2014) analizaron la actividad de la DH en 12 fincas ubicadas en diferentes partes de Costa Rica bajo diferentes manejos agronómicos y en diferentes tipos de suelos de los órdenes Inceptisol y Ultisol, tomando muestras de 0 a 20 cm de profundidad, encontraron que la DH varió de  $0,13$  a  $4,46 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  con promedio de  $1,17 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , valores muy inferiores a los reportados en nuestro estudio, lo que posiblemente se deba a la profundidad de muestreo realizada por estos investigadores y que las muestras fueron tomadas en la mayoría de los casos en la banda de fertilización. Es conocido que un alto nivel de fertilización química afecta en forma negativa a la deshidrogenasa (Rossel et al., 1996).

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0-5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, observaron variación significativa para la DH, cuyos valores promedios fueron de  $89,2 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  para sistemas convencionales, de  $173 \mu\text{g INTF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  para sistemas orgánicos y de  $89,5 \mu\text{g INTF}$

$g^{-1} ss h^{-1}$  para los sistemas tradicionales. Estos valores están un poco por debajo de los hallados en el presente estudio.

El análisis PERMANOVA aplicado a los datos obtenidos en este trabajo (Tabla 4,4), nos permite sugerir que la DH es sensible a los cambios ocasionados por las variaciones de la estacionalidad climática en suelos plantados con las variedades de café Caturra y Catuaí, bajo sombra, fertilización orgánica pasiva y sin la aplicación de insumos agrícolas.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros bioquímicos generales (DH, A.A y DAF).

**Tabla 4.4** Media  $\pm$  error estándar para los parámetros bioquímicos generales (DH, A.A y DAF)

Variable	Catuaí		Caturra		Variedad		Epoca de muestreo		Interacción
	seca	lluvia	seca	lluvia	Pman	Permd	Pman	Permd	
DH	100,3 $\pm$ 6,0	274,2 $\pm$ 14	114,4 $\pm$ 8,7	281,4 $\pm$ 13	ns	ns	***	***	ns
A.A	8,9 $\pm$ 0,9	6,4 $\pm$ 0,5	12 $\pm$ 1	7,0 $\pm$ 0,5	*	ns	***	***	ns
DAF	387,7 $\pm$ 28,3	609,8 $\pm$ 33,4	409,4 $\pm$ 19,2	492,1 $\pm$ 14,7	ns	***	***	ns	**

DH:  $\mu g INTF g^{-1} ss h^{-1}$ ; A.A:  $\mu g N-NH_4 g^{-1} ss h^{-1}$ ; DAF:  $\mu g Fluoresceína g^{-1} ss h^{-1}$ . Nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías (\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; ns= no significativo al 95%).

El análisis de correlación bivariado (anexo II), nos muestra que DH correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con  $\beta$ -glu ( $r = 0,65$ ); A.A ( $r = 0,540$ ); Ureasa ( $r = 0,439$ ); % limo ( $r = 0,379$ ) e inversamente con el %Hum ( $r = -0,55$ ); PT ( $r = -0,422$ ); Pasim ( $r = -0,312$ ) y con el %Hum ( $r = -0,550$ ).

Por otra parte, en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) no encontraron diferencias significativas de actividad DH, cuando compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café. Estos autores relacionan la actividad DH con la actividad general de la microbiota y con el contenido de materia orgánica.

#### 4.5.2. Actividad amonificación de arginina (A.A): ( $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )

Junto con la actividad DAF se consideran indicadoras de la actividad microbiana del suelo (Lin y Brookes 1999; Finkenbein et al., 2013). La amonificación es un proceso por medio del cual se libera amonio a partir de compuestos orgánicos nitrogenados, que sirven como fuente de C y N, que ocurre dentro de la célula (Alef y Kleiner, 1986).

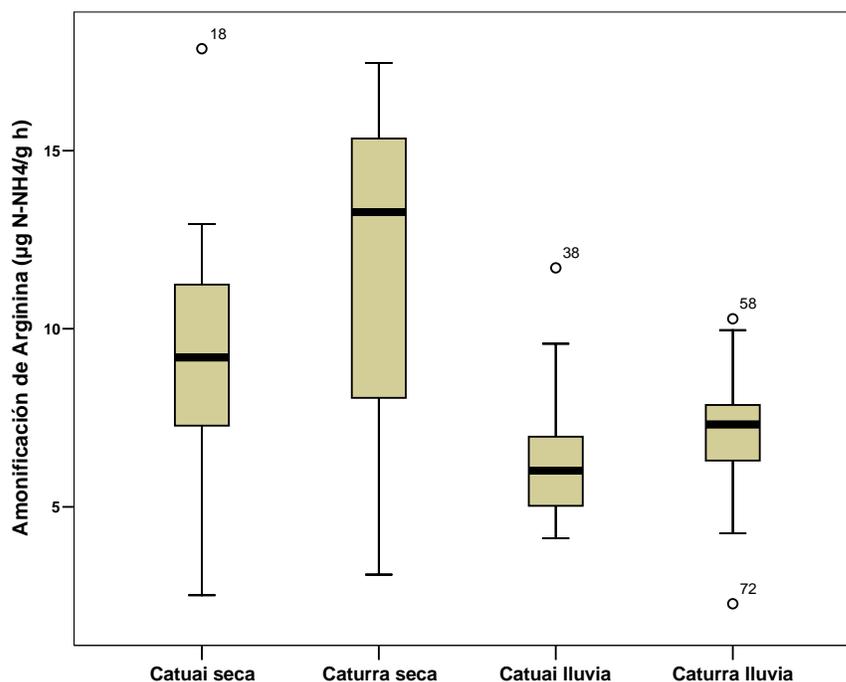
El análisis PERMANOVA de los datos para la actividad amonificación de arginina mostró diferencias significativas  $p < 0,05$  a nivel de las variedades, con mayor actividad en los suelos de la variedad Caturra, en ambas estaciones (Tabla 4.4 y Fig. 4.3), teniendo en cuenta que la dispersión multivariada no es significativa, podemos aceptar que la variación responde al tipo de variedad. También muestra diferencias significativas por la época de muestreos ( $p < 0,001$ ), siendo mayor en la estación seca, sin embargo los datos para la estacionalidad muestran alta dispersión, por lo cual no se puede confiar en que las diferencias respondan estrictamente a la estacionalidad (Tabla 4.4).

El análisis PERMANOVA aplicado a los datos obtenidos en nuestro estudio (Tabla 4,4), nos permite sugerir que la A.A es sensible a los cambios ocasionados por las variaciones de la estacionalidad y por el tipo de variedad en suelos cultivados con las variedades de café Caturra y Catuaí, bajo sombra, fertilización orgánica pasiva y sin la aplicación de insumos agrícolas.

Gómez y Paolini, (2008), estudiaron suelos de sabanas de los llanos orientales venezolanos convertidos a pasturas. Encontraron variabilidad estacional significativa ( $p < 0.001$ ), los valores variaron desde 1,1 a 3,7  $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en la sabana nativa y entre 1,6 a 2,1  $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , para suelos cultivados con *Brachiaria brizantha*. Los valores más altos fueron registrados durante la estación lluvia, estos resultados están un poco por debajo de los valores encontrados en nuestro estudio.

Uzcategui, (2009) investigó sobre la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, encontrando alta variabilidad

entre parcelas y en la estacionalidad, sin embargo el análisis PERMANOVA sólo muestra diferencias significativas entre parcelas, más no en la estacionalidad, en la estación lluviosa la A.A. fue  $15,85 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  mientras que en la estación seca fue  $14 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ . Estos valores son muy parecidos a los hallados en nuestro estudio para la estación seca.



**Figura 4.3** Fluctuación estacional de la Amonificación de la arginina para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0-5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, encontraron variación significativa para la A.A. cuyos valores promedios variaron de  $6,1 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas convencionales, de  $2,9 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas orgánicos y de  $2,3 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en sistema tradicional. Pero no encontraron diferencias significativas entre los sistemas de manejo tradicional y convencional. Estos valores están un poco por debajo de los encontrados en este trabajo.

El análisis de correlación bivariado (anexo II), muestra que A.A. correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con DH ( $r = 0,540$ );  $\beta$ -glu ( $r = 0,325$ ); Ureasa ( $r =$

0,672); caseinasa ( $r = 0,346$ ); pH ( $r = 0,513$ ); Ca ( $r = 0,470$ ); limo ( $r = 0,439$ ) e inversamente con Al+H ( $r = -0,378$ ); con DAF ( $r = -0,423$ ) y con CICR ( $r = -0,335$ ). La A.A correlacionó con la mayoría de enzimas estudiadas, lo cual nos permite sugerir que esta es una enzima importante a tener en cuenta en los estudios sobre actividad enzimática de suelos cafetaleros.

#### **4.5.3. Actividad hidrólisis del diacetato de fluoresceína (DAF):**

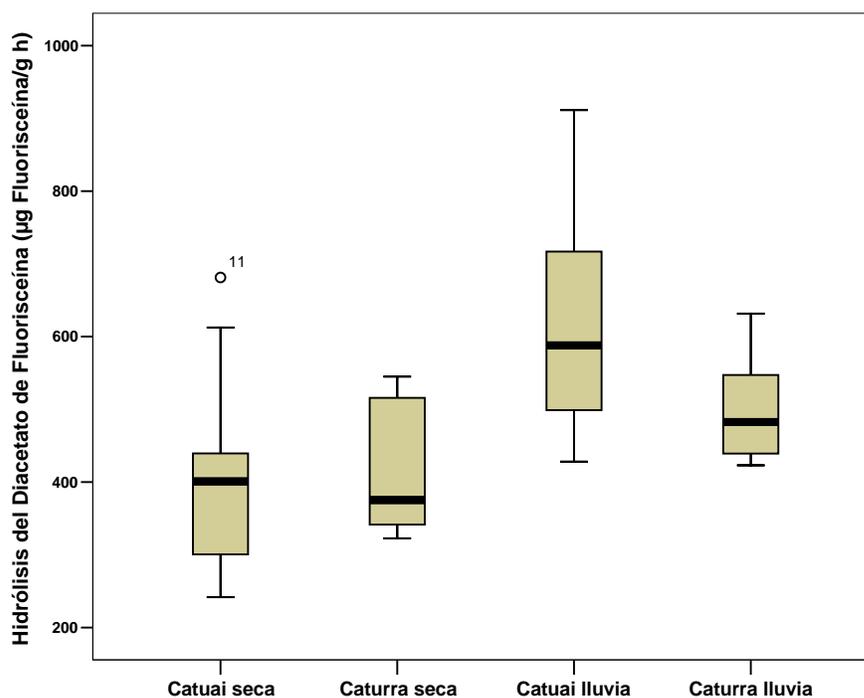
**( $\mu\text{g Fluoresceína g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )**

La DAF se ha usado como indicador de la actividad de las enzimas hidrolíticas del suelo, debido a que es hidrolizada por un conjunto de enzimas: proteasas, lipasas y esterases, por lo tanto se considera un parámetro que mide la actividad heterotrófica del suelo (Taylor et al., 2002; Nannipieri et al., 2003; Gómez y Paolini, 2006). Otros investigadores han encontrado mayor actividad DAF con el aumento del contenido de MOS (León et al., 2006; Benintende et al., 2008; Paolini et al., 2010; Correa et al., 2010; Aponte et al., 2011; Tripathy et al., 2014).

El análisis PERMANOVA aplicado a los datos obtenidos para la actividad DAF mostró interacción, lo que se refleja en que la actividad fue mayor en los suelos con Catuaí que en Caturra en la estación lluviosa, sin embargo la actividad fue mayor en los suelos con Caturra que en los suelos con Catuaí, durante la estación seca (diferencia cruzada) (Tabla 4,4). En el análisis PERMANOVA también se observan diferencias significativas en la estacionalidad climática con los mayores valores en la estación lluviosa para ambas variedades (Tabla 4,4 y Fig. 4,4). La dispersión multivariada no significativa, nos permite asumir que las variaciones son intrínsecas a la estacionalidad. No se observa diferencias significativas entre las variedades.

El análisis PERMANOVA aplicado a los datos obtenidos en nuestro estudio (Tabla 4,4 y Fig. 4,4), nos permite sugerir que la DAF es sensible a los cambios ocasionados por las variaciones de la estacionalidad climática en suelos plantados con las variedades de café Caturra y Catuaí, bajo sombra y sin la aplicación de insumos agrícolas.

En un estudio realizado en suelos de sabana en los llanos orientales venezolanos por Gómez y Paolini (2008) encontraron que la DAF fue afectada significativamente por la variación estacional ( $p < 0,001$ ). Los valores variaron de 38,7 a 51,1  $\mu\text{g Fluoresceína g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en la sabana nativa y de 40,8 a 44,7  $\mu\text{g Fluoresceína g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo cobertura de *Brachiaria brizantha*, los mayores valores fueron encontrados en la estación lluviosa. Estos valores son muy inferiores a los hallados en nuestro estudio para suelos cafetaleros, sin embargo coinciden en la variación estacional, observando los mayores valores en la estación lluviosa, debido posiblemente a una mayor actividad de la microbiota favorecida por la humedad del suelo. Mientras que Chacón et al. (2009) en el Parque Nacional “Cerro Saroche” en suelos con vegetación natural como también con vegetación de plantas exóticas, encontraron valores que variaron desde 140 – 380  $\mu\text{g Fluoresceína g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ . Valores muy parecidos a los menores encontrados en nuestra investigación.



**Figura 4.4.** Fluctuación estacional de la Hidrólisis del diacetato de fluoresceína para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Varios investigadores han encontrado valores más altos para DAF bajo sistemas orgánicos o conservacionistas comparados con sistemas convencionales (León et al., 2006; Benitez et al., 2008; Correa et al., 2010; Evangelista et al., 2012); mayores valores en suelos de minería de carbón en reforestación con enmienda de material fino de la mina, comparado con el mismo sistema pero sin enmienda (Finkenbein et al., 2013). Por otra parte la actividad DAF no mostró diferencias significativas por estacionalidad en bosques de araucaria (Carvalho et al., 2012).

Uzcategui, (2009), investigó sobre la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, observando diferencias significativas por estacionalidad y por el manejo agrícola, los mayores valores de DAF en la estación lluvia (intervalo de 154,6 a 392,7  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  y promedio 255  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ) y menores valores en la estación seca (intervalo de 170,8 a 230,8  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  y promedio 195  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ). Las diferencias significativas por estacionalidad encontrados por esta investigadora están en concordancia con nuestros hallazgos, aunque los valores encontrados son menores a los hallados en nuestro estudio.

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0-5 cm) de suelos cafetaleros en el estado Mérida, hallaron variación significativa para la DAF cuyos valores variaron de 38,3  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas convencionales a 81,4  $\mu\text{g}$  Fluoresceína  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas orgánicos. Pero no encontraron diferencias significativas entre los sistemas de manejo tradicional y orgánico. Estos valores son menores a los encontrados en el presente trabajo.

El análisis de correlación bivariada (anexo II), nos muestra que DAF correlacionó significativa y positivamente ( $p < 0,01$ ) con CICR ( $r = 0,407$ ); Mg ( $r = 0,464$ ); K ( $r = 0,462$ ); %Hum ( $r = 0,334$ ) e inversamente con A.A. ( $r = -0,423$ ); Ureasa ( $r = -0,521$ ); pH ( $r = -0,512$ ); y con la caseína ( $r = -0,347$ ).

#### 4.5.4. Actividad fosfomonoesterasa ácida (Ptsa): ( $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )

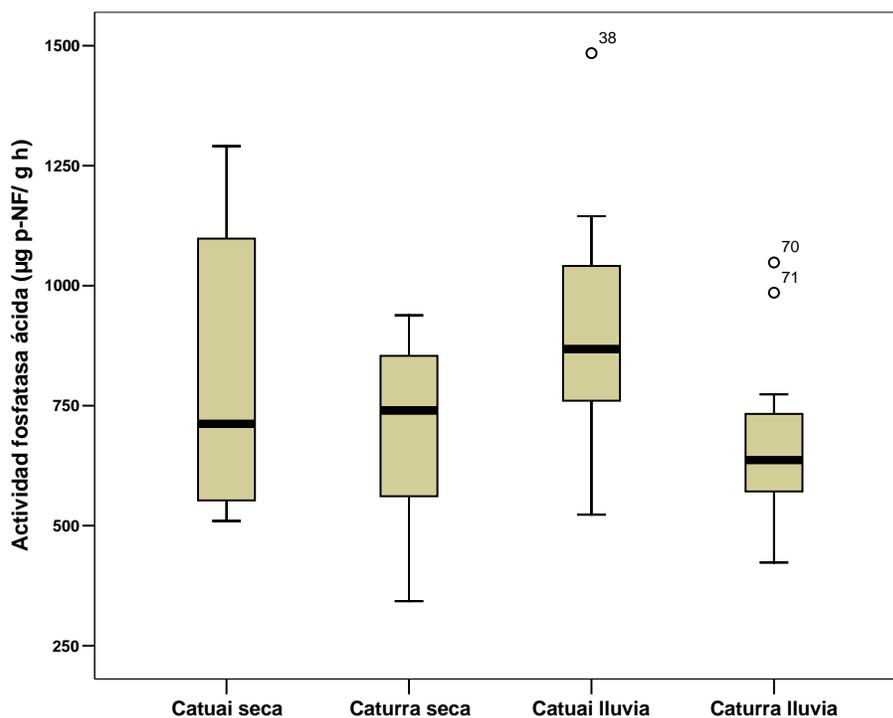
Fosfomonoesterasas, es el nombre general dado a un gran grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis tanto de esteres como de anhídridos del  $\text{H}_3\text{PO}_4$  también llamadas fosfatasas (Ptsa). La Ptsa ácida ha sido ampliamente estudiada por su óptima actividad bajo condiciones ácidas y su importancia en la mineralización del P orgánico del suelo y en la nutrición de las plantas (Tabatabai, 1994; Alef y Nannipieri, 1995; Dick, 1997). Se ha sugerido que las fosfomonoesterasas se producen cuando el contenido de P disponible en el suelo alcanza niveles críticos (Speir y McGill, 1979). Se considera que las mayores fuentes de fosfatasas en el suelo son los microorganismos, debido a su alta actividad metabólica y corto ciclo de vida, con varias generaciones por año, permitiendo la producción de altas cantidades de enzimas (Balota y Chaves, 2010). Por otra parte, la fertilización fosfórica puede reducir la actividad fosfatasa (Speir y McGill, 1979).

El análisis PERMANOVA muestra diferencia significativa ( $p < 0,001$ ) entre variedades, con mayores valores de actividad Ptsa para suelos con la variedad Catuaí (Tabla 4.5 y Fig. 4,5). Debido a que la dispersión multivariada es significativa, podemos decir que la variación es influenciada por diversos factores. Estos resultados nos permiten sugerir que la Ptsa es sensible a los cambios ocasionados en los suelos por el tipo de variedad de café, bajo sombra y sin la aplicación de insumos agrícolas. La cantidad de fosfatasa acida secretada por las plantas es genéticamente controlada y difiere con las especies cultivables y sus variedades (Ndakidemi, 2006; Izaguirre-Mayoral et al., 2002) así como las practicas de manejo (Patra et al., 1990; Staddon et al., 1998; Wright y Reddy, 2001).

Paolini (2011) observó alta variación en suelos de los Altos Llanos Centrales de Venezuela (estado Guárico), el valor más bajo  $103 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  corresponde a un suelo bajo vegetación típica de sabana y el más alto  $545 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  fue encontrado en suelos bajo vegetación de bosque. La actividad de la fosfatasa ácida correlacionó significativamente con el carbono orgánico ( $r = 0,86$ ), el NT ( $r = 0,89$ ), la CE ( $r = 0,80$ ), el Ca intercambiable ( $r = 0,74$ ) y la actividad proteásica ( $r = 0,90$ ). Los valores encontrados para suelos de bosque se aproximan a los valores hallados en nuestro estudio. Mientras que

Contreras et al. (2006) en suelos con enmiendas orgánicas, del estado Mérida, reportaron valor promedio de  $150 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , menores a los hallados en este trabajo.

Varios autores han reportado valores más altos de Ptsa en suelos bajo sistemas de manejo orgánico o conservacionista comparados con sistemas bajo manejos convencionales (Melero et al., 2006; Benítez et al., 2006; Madejón et al., 2007; Correa et al., 2010; Souza et al., 2012; Baldrian et al., 2013), mayores valores en suelos mineros de carbón sin enmienda comparados con los mismos suelos enmendados con cenizas de paja de arroz (Finkenbein et al., 2013).



**Figura 4.5** Fluctuación estacional de la actividad de la Fosfatasa ácida para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

La actividad Ptsa ácida varió de  $100 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en un sistema de transición hacia manejo orgánico durante el invierno a  $900 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en un sistema de caña de azúcar permanente durante el verano (Evangelista et al., 2012), los valores encontrados en el

sistema más estable (caña de azúcar) coinciden con los valores encontrados en nuestro estudio para suelos cafetaleros.

Paolini y Arellano (2004) investigaron suelos cafetaleros en la Microcuenca del Río Monaquito del estado Trujillo, encontraron diferencias significativas entre un sistema sin manejo donde la actividad Ptsa alcanzó los mayores valores de  $367 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ , comparado con sistemas bajo manejo tradicional con valores promedio de  $159 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ , estos valores son bajos respecto a los encontrados en este estudio, posiblemente debido a las diferencias intrínsecas a los tipos de suelos Haplustults encontrados en los cafetales investigados por Paolini y Arellano (2004).

En suelos cafetaleros bajo manejo orgánico en la cuenca alta del río Yacambú, estado Lara, los valores de actividad Ptsa ácida alcanzaron  $504 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  (Suárez, 2005) estos valores son bajos respecto a los encontrados en este estudio, lo cual podría estar asociado a la variabilidad pedogenética entre los suelos.

Murillo (2007) investigó suelos cafetaleros en la región de San Diego de los Altos, estado Miranda, comparó un suelo control sin enmiendas orgánicas vs suelos con diferentes enmiendas orgánicas (gallinaza, vermicompost y compost), encontró los valores más altos en suelos enmendados con compost  $1335 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  y los más bajos en el suelo control o testigo  $1271 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ , más altos que los encontrados en nuestra investigación, probablemente relacionado con la aplicación de enmiendas orgánicas.

En suelos cafetaleros al sur de Sumatra en Indonesia, se evaluó el efecto de la cobertura con malezas sobre la actividad de algunas enzimas. La actividad Ptsa ácida fue significativamente mayor en los suelos con cobertura de vegetación natural ( $209,3 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ), que en el control, sin cobertura ( $109,3 \mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ) y no encontraron diferencias significativas entre los valores para los suelos con cobertura natural y aquellos con cobertura de *Paspalum conjugatum* (Salam et al., 2001). Estos investigadores encontraron correlación significativa de la actividad Ptsa con el contenido de Pasim, y relacionaron la disminución de actividad enzimática en las parcelas control, con la alta

erosión ocasionada por la falta de cobertura. Los valores encontrados por estos investigadores son inferiores a los hallados en nuestra investigación, resultados que pueden estar relacionados a la profundidad de muestreo (0 – 20 cm), así como a menores valores de COT (34,8 g kg<sup>-1</sup>) en los suelos estudiados por estos investigadores.

Uzcategui (2009) investigó sobre la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos encontrando mayores valores de Ptsa ácida en la estación lluvia (839,2 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>) y menores valores en la estación seca (338,4 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>). Los valores encontrados en la estación lluvia, coinciden con los hallados en nuestro estudio.

Valores consistentes con los hallados en esta investigación fueron reportados por Balota y Chaves (2010) en suelos bajo el sistema café intercalado con diferentes cultivos de leguminosas. La actividad Ptsa fue menor bajo el dosel de los arbustos de café, variando de 256 a 555 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>. Mientras que en el suelo entre surcos (calles) varió de 320 a 635 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>. Los mayores valores fueron observados en la asociación café - *Leucaena leucosephala*.

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0 - 5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, encontraron variación significativa para la fosfatasa ácida al comparar diversos sistemas de manejo, cuyos valores variaron de 165,4 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup> bajo sistemas convencionales a 437,2 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup> bajo sistemas orgánicos, pero no encontraron diferencias significativas entre los sistemas de manejo tradicional y convencional. Estos valores son menores a los encontrados en nuestro estudio, lo cual podría estar relacionado con el manejo agronómico y las características intrínsecas a cada suelo (Henríquez et al., 2014).

Durango et al. (2015) en Costa Rica, observaron fuerte disminución de la actividad fosfatasa en el agroecosistema café – banano (1791 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>), comparado con el agroecosistema café (3185 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>) y con el bosque (4433 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>), valores todos superiores a los encontrados en este estudio, posiblemente relacionado a menores

valores del pH de aquellos suelos (pH: 3,9 – 4,5) que puede favorecer la actividad de la fosfatasa ácida. Mientras que en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, encontrando en la capa superficial (0 – 10 cm), mayores valores de actividad fosfatasa en el sistema de manejo orgánico (8300  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ) y los menores valores en el sistema intercalado con *Arachis pintoi* (4600  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ). Valores sensiblemente mayores a los encontrados en este estudio y a los reportados en la literatura. Los resultados de actividad enzimática dependen de aspectos como el tipo de cultivo, manejo agronómico y características intrínsecas del suelo (Henríquez et al., 2014).

El análisis de correlación bivariado (anexo II), nos muestra que la Ptsa ácida correlacionó significativa y positivamente ( $P < 0,01$ ) con el Pasim ( $r = 0,534$ ); PT ( $r = 0,555$ ); caseinasa ( $r = 0,359$ ); NT ( $r = 0,418$ ); COT ( $r = 0,304$ ); CICR ( $r = 0,390$ ); K ( $r = 0,441$ ) y %Hum ( $r = 0,464$ ).

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros bioquímicos específicos (Ptsa,  $\beta$ -glu, ureasa y caseinasa).

**Tabla 4.5** Media  $\pm$  error estándar para los parámetros bioquímicos específicos (Ptsa,  $\beta$ -glu, ureasa y caseinasa)

Variable	Catuaí		Caturra		Variedad		Epoca de muestreo		Interacción
	seca	lluvia	seca	lluvia	Pman	Permd	Pman	Permd	
Ptsa	816,5 $\pm$ 63	895,4 $\pm$ 54	687,5 $\pm$ 47	658,6 $\pm$ 40	***	*	ns	ns	ns
$\beta$ -glu	143 $\pm$ 14	164 $\pm$ 11	148 $\pm$ 23	156 $\pm$ 20	ns	*	ns	ns	ns
Ureasa	87,5 $\pm$ 2,8	85,4 $\pm$ 2,5	96,7 $\pm$ 11	90,1 $\pm$ 6,5	ns	**	ns	**	ns
Casein	583,7 $\pm$ 34	465,1 $\pm$ 21	515 $\pm$ 29	516,3 $\pm$ 25	ns	ns	*	ns	*

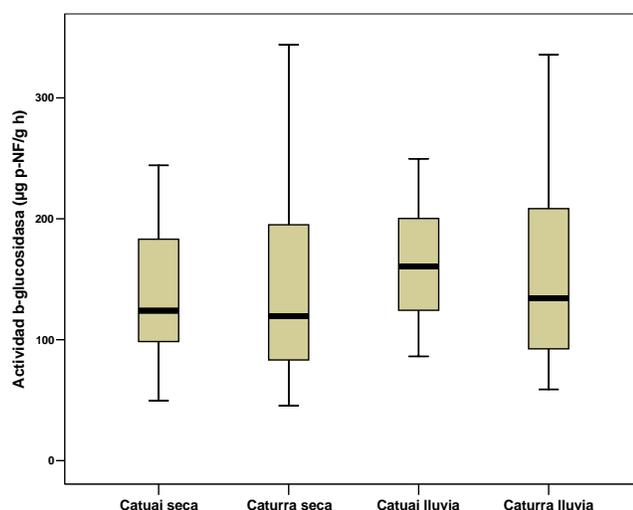
Ptsa  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ;  $\beta$ -gluc  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ; ureasa  $\mu\text{g N-NH}_4 \text{g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ; caseinasa  $\mu\text{g Tirosina g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ . Nivel de significancia para cada factor en PERMANOVA (pman) y PERMDISP (Permd) de dos vías (\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; ns= no significativo al 95%).

#### 4.5.5. Actividad $\beta$ -glucosidasa ( $\beta$ -glu): ( $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )

Es una enzima útil en el monitoreo de la calidad del suelo, debido a su papel central en el ciclaje de la MOS (Melo et al., 2013; Stott et al., 2010). Está involucrada en el ciclo del C, cataliza la conversión de disacáridos a glucosa (Martens et al., 1992; Alef y Nannipieri, 1995), actúa en la etapa final del proceso de hidrólisis de la celulosa y otros oligosacáridos, liberando glucosa, una importante fuente de carbono para la vida de los microorganismos en el suelo y tiene relación directa con la MOS (Eivazi y Tabatabai, 1988).

El análisis PERMANOVA muestra que la actividad de esta enzima no varió a lo largo del tiempo de estudio, ni tampoco mostró diferencias significativas entre variedades. (Tabla 4.5 y Fig. 4.6).

Varios investigadores han encontrado altos niveles de actividad  $\beta$ -glucosidasa bajo sistemas de manejo orgánico o conservacionistas, comparados con sistemas convencionales (Matsuoka et al., 2002; León et al., 2006; Benítez et al., 2006; Madejón et al., 2007; Silveira, 2007; Silva, 2008; Correa et al., 2010; Moeskops et al., 2010; Pajares et al., 2011; Alcântara et al., 2011; Evangelista et al., 2012; Baldrian et al., 2013; Falcão et al., 2013).



**Figura 4.6** Fluctuación estacional de la actividad de la  $\beta$ -Glucosidasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

La actividad  $\beta$ -glucosidasa no mostró diferencias significativas en la estacionalidad ni entre los bosques con *Araucaria angustifolia* estudiados en el estado Sao Paulo, los valores promedio variaron de 355,5  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  en la estación lluviosa a 388,7  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  en la estación seca (Carvalho et al., 2012). Estos valores son más altos que los encontrados en nuestro estudio, sin embargo están en concordancia con nuestros hallazgos al no encontrar diferencias significativas en la estacionalidad.

En suelos cafetaleros al sur de Sumatra en Indonesia, se evaluó el efecto de la cobertura con malezas sobre la actividad de algunas enzimas. La actividad  $\beta$ -glu., fue significativamente mayor en los suelos con cobertura de *Paspalum conjugatum* (129  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ), que en el control, sin cobertura (76  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$ ) y no encontraron diferencias significativas entre los valores para los suelos con cobertura de *P. conjugatum* y aquellos con cobertura de vegetación natural (Salam et al., 2001). Estos investigadores encontraron correlación significativa de la actividad  $\beta$ -glucosidasa, con el contenido de Pasim, y relacionaron la disminución de actividad enzimática en las parcelas control, con la alta erosión ocasionada por la falta de cobertura. Los valores encontrados por estos investigadores para los suelos cafetaleros con cobertura vegetal son similares a los hallados en nuestra investigación, cuya similitud posiblemente esté relacionada con las condiciones de cobertura del suelo en ambos estudios.

En investigaciones realizadas en suelos cafetaleros del estado Trujillo por Paolini y Arellano (2004) hallaron variaciones desde 30  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  bajo sistemas de manejo conservacionista a 77  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ssh}^{-1}$  en suelos sin ningún tipo de manejo, valores que son muy bajos comparados con los encontrados en este estudio, lo cual probablemente se debe a la variabilidad pedogenética entre estos suelos.

En suelos cafetaleros del estado Miranda, en la región de San Diego de los Altos, Murillo (2007) encontró un valor promedio de 249,2  $\mu\text{g p-NF g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , más altos que los hallados en nuestro estudio. También en la misma finca, Uzcategui (2009) investigó sobre la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, encontrando mayores valores de  $\beta$ -glucosidasa en la estación lluvia (252  $\mu\text{g p-$

NF g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup>) y menores valores en la estación seca (199 µg p-NF g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup>), sin embargo, en el análisis estadístico no se observa diferencias significativas en la estacionalidad, lo cual está de acuerdo con nuestros resultados, aunque los valores son un poco mayores a los nuestros.

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0 - 5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, encontraron variación significativa para la β-glu cuyos valores variaron de 41,4 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup> bajo sistema convencional a 123,1 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup> bajo sistema orgánico. Encontraron diferencias significativas también con los sistemas de manejo tradicional (75,1 µg p-NF g<sup>-1</sup>ssh<sup>-1</sup>). Estos valores están un poco por debajo de los encontrados en nuestro trabajo, quizás relacionado con menores valores de pH en los suelos estudiados por Paolini et al. (2013) cuyos valores variaron de 4,46 a 4,49 comparados con los reportados en los suelos de la presente investigación (4,6 – 5,8).

El análisis de correlación bivariado (anexo I), nos muestra que la β-glucosidasa, correlacionó significativa y positivamente ( $P < 0,01$ ) con DH ( $r = 0,652$ ); C<sub>mic</sub> ( $r = 0,389$ ); A.A ( $r = 0,325$ ); %limo ( $r = 0,416$ ); C<sub>mic</sub> ( $r = 0,389$ ); negativamente con qCO<sub>2</sub> ( $r = -0,318$ ); qCO<sub>2</sub>/Corg ( $r = -0,311$ ).

Madejón et al. (2007) también encontró correlación significativa y positiva de la β-glucosidasa con la DH y C<sub>mic</sub>, además con el COT y la proteasa. Otros investigadores reportan positiva y significativa correlación de la actividad β-glucosidasa con el contenido de COT en los suelos (Silveira, 2007; Pajares et al., 2011; Kujur et al., 2011; Falcão et al., 2013); con la MOS y el PT (Scott et al., 2010); con la MOS, Rbas, PT, NT y %Hum (Hedo et al., 2015a); con la Ureasa, DH, Ptsa y Proteasa (Pajares et al., 2011). Aunque muchos investigadores reportan positiva y significativa correlación de la β-glucosidasa con el COT, este no fue el caso para nuestro estudio, posiblemente debido a que los contenidos de COT son altos en los suelos de este estudio (Tabla 3.2).

#### 4.5.6. Actividad ureasica (ureasa): ( $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )

La ureasa es la enzima que cataliza la hidrólisis de urea a  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  el cual es un proceso vital en la regulación del suministro de N a las plantas a partir del N orgánico y después de la fertilización con urea (Balota y Chaves, 2010). Alta reducción de la actividad ureasa puede afectar negativamente el crecimiento y producción de las plantas, por lo tanto un mejor conocimiento de la dinámica de la actividad ureasa podría indicar la forma más efectiva de manejar la fertilización nitrogenada (Balota y Chaves, 2010).

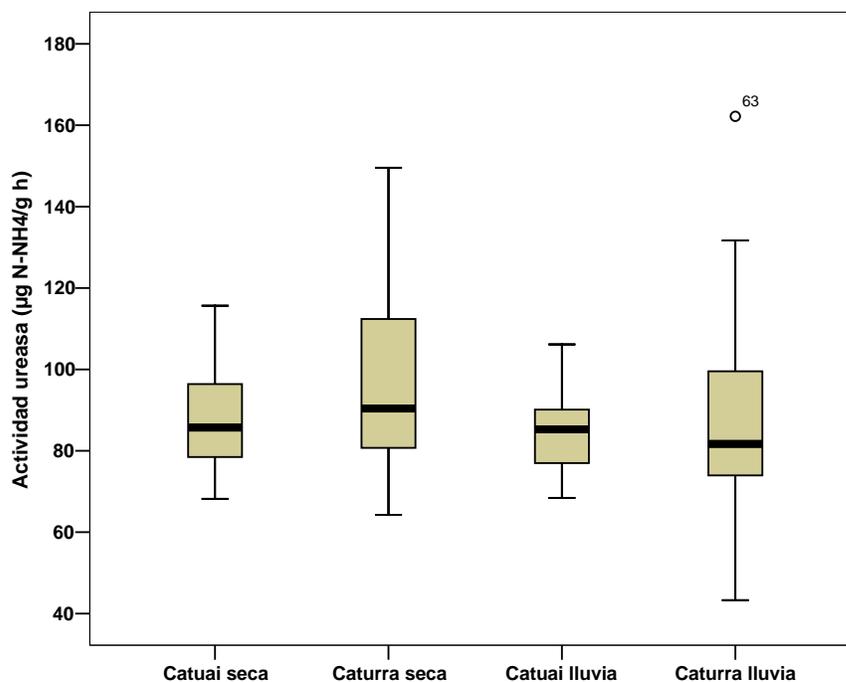
El análisis PERMANOVA no mostró variación significativa ni por las variedades cultivadas ni por época de muestreo (Fig. 4.7). Se observa dispersión multivariada significativa ( $p < 0,01$ ) (Tabla 4.5), posiblemente relacionada con alta heterogeneidad en las propiedades del suelo para un mismo muestreo. Estos resultados nos permiten sugerir que la actividad ureasica, no fue sensible a los cambios ocasionados por la estacionalidad, ni por la variedad de café establecida en estos suelos.

La actividad ureasica en suelos de los Altos Llanos Centrales de Venezuela (Estado Guárico) varió de 5 a  $86 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , los valores más altos en suelos bajo vegetación de palmar y los más bajos en suelos de sabana (Paolini, 2011). Los valores para suelos con vegetación palmar coinciden con los encontrados en este estudio en la estación lluviosa, relacionado con la mayor fertilidad de los suelos de bosque de los Altos Llanos Centrales de Venezuela, mientras que en los suelos de sabana se observaron los mayores valores de Al e H intercambiables.

Los valores encontrados en este estudio están dentro de la amplia variación reportada por Trasar-Cepeda et al. (2008a) quienes investigaron el efecto del uso del suelo sobre las propiedades bioquímicas, para la actividad ureasica encontraron variaciones desde  $38 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en suelos con viñedos hasta  $354 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en pastizales. Valores mucho más altos fueron encontrados por Zhang et al. (2011) quienes reportaron variaciones entre 380 y  $1600 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en suelos desarrollados a partir de loess bajo diferentes tipos de reforestación.

Barros et al. (2013) evaluaron la actividad ureasica en suelos de la región de Pernambuco – Brasil, bajo diferentes sistemas de cultivo, la mayor actividad  $106,7 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  fue observada bajo sistemas de pastoreo, posiblemente favorecido por el aporte de materia orgánica del estiércol bovino. Estos valores están en concordancia con los hallados en este trabajo.

En estudios más recientes realizados por Hedo et al. (2015b) en suelos de bosques secos y semiáridos con *Pinus halepensis* bajo diferentes manejos post-incendios, encontraron variaciones entre 10 y  $190 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ . En otro estudio en los mismos suelos Hedo et al. (2015a) encontraron variación significativa por estacionalidad, para bosques semiáridos los valores variaron desde  $170 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en invierno a  $220 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en verano. Estos valores son semejantes a los hallados en nuestro trabajo.



**Figura 4.7** Fluctuación estacional de la actividad ureasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

Paolini y Arellano, (2004), quienes en suelos cafetaleros clasificados taxonómicamente como Haploustult del estado Trujillo encontraron valores entre 13 y  $60 \mu\text{g}$

N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup>, más bajos que los encontrados en nuestra investigación, posiblemente debido a la variabilidad por tipo de suelo.

En suelos cafetaleros bajo diferentes sistemas de manejo en la cuenca alta del río Yacambú, estado Lara, los mayores valores de actividad ureasica 33 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup> fueron encontrados bajo el sistema café – fertilización química – manejo tradicional más cal (Suárez, 2005), estos valores son muy bajos respecto a los encontrados en este estudio, tal vez debido a la fertilización química utilizada en aquellos suelos la cual puede estar reduciendo la actividad de la microbiota del esos suelos.

En suelos cafetaleros del estado Miranda, Murillo (2007), encontró valores de 38 a 40 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup>, muy bajos con respecto a los hallazgos reportados en este trabajo, mientras que Uzcategui, (2009), también en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, encontró valores de actividad ureasica en la estación lluvia de 35,1 a 124,3 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup> y en la estación seca 55 a 127,3 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup>. No encontró diferencias significativas por estacionalidad. Estos valores están dentro del rango de valores hallados en nuestro estudio.

Al evaluar la actividad ureasica en suelos sembrados con café, intercalados con diferentes cultivos de leguminosas, se encontró que *L. leucocephala* incremento la actividad ureasa bajo el dosel de los arbustos de café, mientras que *Crotalaria breviflora* la incrementó en los callejones. Las variaciones encontradas fueron: de 78 a 258 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup> en suelos bajo el dosel de los arbustos de café y de 63 a 154 en los suelos de los callejones (Balota y Chaves, 2010).

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0 - 5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, reportaron variación significativa para la ureasa cuyos valores variaron de 34,5 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup> bajo sistemas convencionales a 57,5 µg N-NH<sub>4</sub> g<sup>-1</sup>ss h<sup>-1</sup> bajo sistemas orgánicos, no hallaron diferencias significativas entre los sistemas de manejo orgánico y tradicional. Estos valores están un poco por debajo de los encontrados en nuestra investigación, esto quizás es debido a los

menores valores de pH reportados en los estados Merida y Trujillo (4,5) mientras que en El Laurel el pH varió entre 4,6 y 5,8 y teniendo en cuenta además que en ambos trabajos se usó los mismos métodos de laboratorio, no hay diferencias significativas en los valores de COT, NT, los árboles de sombra son los mismos.

En un estudio realizado en Brasil, al sur del estado de Minas Gerais, Lammel et al. (2015) compararon varios sistemas de manejo de las plantaciones de café, hallando en la capa superficial (0 – 10 cm), mayores valores de actividad ureasica en el sistema de manejo orgánico ( $5,7 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ) y los menores valores en el sistema intercalado con *Arachis pintoii* ( $2,7 \text{ N-NH}_4 \text{ g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ). Estos valores son sensiblemente menores a los observados en este estudio, probablemente debido a que el estudio realizado por Lammel et al. (2015) fue en suelos que habían sido cambiados de sistemas de manejo convencional a manejo orgánico y las muestras fueron obtenidas sólo cinco (5) años después del cambio.

El análisis de correlación bivariado (anexo II), nos muestra que la actividad ureasa correlacionó significativa y positivamente ( $P < 0,01$ ) con la Rbas ( $r = 0,465$ );  $q\text{CO}_2$  ( $r = 0,314$ ); caseinasa ( $r = 0,512$ ); DH ( $r = 0,439$ ); A.A ( $r = 0,672$ ); pH ( $r = 0,420$ ); Ca ( $r = 0,313$ ); e inversamente con DAF ( $r = -0,521$ ); CE ( $r = -0,312$ ); CICR ( $r = -0,390$ ); Mg ( $r = -0,667$ ); %Hum ( $r = -0,492$ ). Podemos observar que la actividad ureasa, correlaciona con muchas de las variables estudiadas, lo cual nos indica su gran importancia en los suelos objeto de este estudio.

Varios autores reportan correlación significativa y positiva de la actividad ureasica con el COT (Longo y Melo, 2005; Zhang et al., 2011; Kheirodin et al., 2012), sin embargo este no fue el caso para nuestro estudio, posiblemente debido a que en este caso la actividad ureasa no varió a lo largo del estudio, y probablemente su actividad estuvo influenciada por diversos parámetros, lo cual se infiere por la dispersión multivariada significativa observada en el análisis PERMANOVA. Kheirodin et al., 2012, además encontró correlación significativa con  $C_{mic}$ , NT, Rbas y A.A; en lo cual presenta coincidencia con nuestros hallazgos.

#### 4.5.7. Actividad proteásica – caseinasa: ( $\mu\text{g}$ tirosina $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ )

Las proteínas en el suelo representan una fuente de N fácilmente movilizable y su hidrólisis es catalizada por un grupo de enzimas denominadas proteasas, las cuales son sintetizadas por bacterias, hongos y actinobacterias. Estas enzimas pueden ser estabilizadas en la matriz del suelo, por adsorción a sustancias húmicas o a los minerales arcillosos (Paolini et al., 2006). La actividad proteasa depende de la distribución de bacterias proteolíticas y de la cantidad de sustratos proteínicos disponibles en la MOS (Sardans et al., 2008; Anjaneyulu et al., 2011; Kujur et al., 2012).

En los resultados del PERMANOVA (Tabla 4.5) se observa una interacción significativa ( $p < 0,05$ ), entre época climática de muestreo y tipo de variedad, indicándonos que ambos factores influenciarán los resultados. Además nos muestra una variación significativa ( $p < 0,05$ ) por la época de muestreo, con mayores valores de actividad en la estación seca (Fig. 4.8 y Tabla 4.5) El PERMDISP registra dispersión multivariada significativa, lo cual nos indica que la variación observada puede estar influenciada por otros factores además de los cambios por época de muestreo, resultados que están en concordancia con la interacción observada. Estos resultados nos permiten sugerir que la actividad proteasica, es sensible a los cambios ocasionados por la época de muestreo, mas no por la variedad de café establecida en estos suelos.

La actividad proteasica en suelos de los Altos Llanos Centrales de Venezuela (Estado Guárico) varió de 5 a 55  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ , los valores más altos en suelos bajo vegetación de bosque y los más bajos en suelos de sabana. La proteasa mostró una fuerte correlación con el COT ( $r = 0,78$ ), el NT ( $r = 0,89$ ), la CE ( $r = 0,96$ ) y el Ca intercambiable ( $r = 0,95$ ), con la Ptsa ácida y con el K intercambiable ( $r = 0,85$ ) (Paolini, 2011). Estos valores están en concordancia con nuestros resultados.

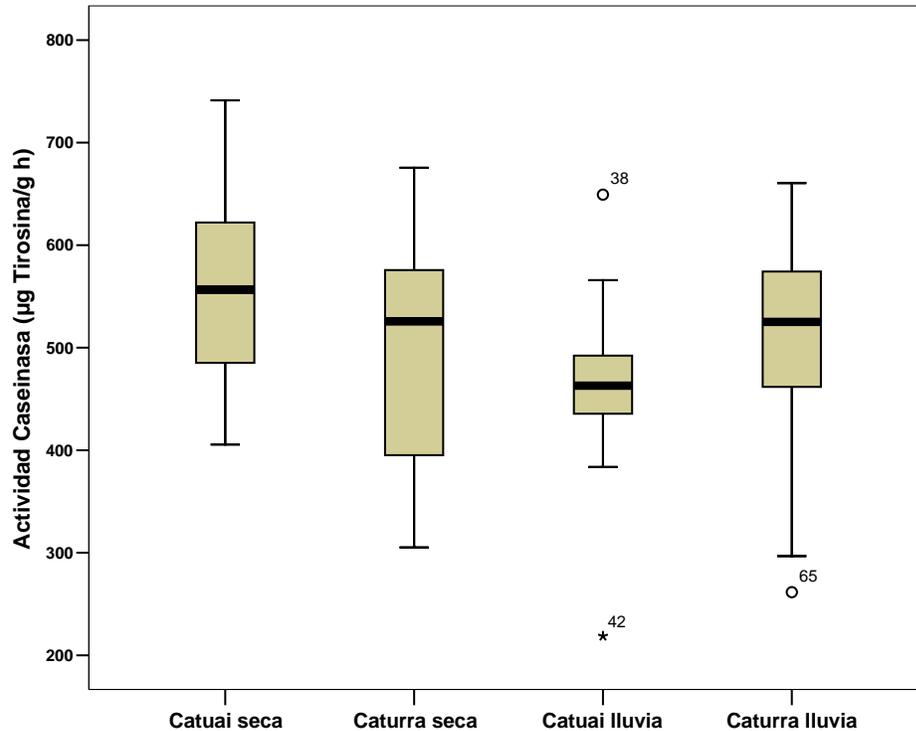
Madejón et al., 2007 en suelos del semiárido mediterráneo encontró valores entre 59,4  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo manejo tradicional a 92,7 bajo manejo conservacionista, valores mayores a los encontrados en nuestro estudio. Mientras que Sardans y Peñuelas (2005)

encontraron reducciones de la actividad caseinasa al disminuir el contenido de humedad del suelo, sus hallazgos variaron de 18,5  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en primavera (21% menos humedad) que en el control 27,0  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  y entre 15,1  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en otoño y 19,0  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en el control (21% más humedad). Por otra parte Sardans et al. (2008), en suelos de matorral mediterráneo encontraron variaciones entre 23,6  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en verano y 61,6  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  en primavera. Nuestros resultados están dentro del rango de valores encontrados por estos investigadores.

Resultados menores a los hallados en este estudio fueron encontrados en suelos con cafetales bajo sombra en el estado Trujillo por Paolini et al. (2006) quienes observaron variaciones desde  $75,6 \pm 43$   $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo manejo conservacionista a 135,4  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas sin ningún tipo de manejo.

En suelos cafetaleros del estado Miranda, Murillo (2007) reportó un valor de 391  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  que está dentro del rango encontrado por Uzcategui (2009) quien investigó sobre la variación estacional de las propiedades bioquímicas en suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos, encontrando mayores valores de actividad caseinasa en la estación lluvia ( $453 \pm 154$   $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ) y menores valores en la estación seca ( $317 \pm 75$   $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$ ). Estos resultados son parecidos con los hallados en nuestro estudio.

Paolini et al. (2013) estudiaron las propiedades bioquímicas en la capa superficial (0-5 cm) de suelos cafetaleros en los estados Mérida y Trujillo, encontraron variación significativa para la caseinasa cuyos valores variaron de 91,6  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas convencionales a 156  $\mu\text{g}$  tirosina  $\text{g}^{-1}\text{ss h}^{-1}$  bajo sistemas orgánicos, y no encontraron diferencias significativas entre los sistemas bajo manejo orgánico y tradicional. Estos valores son un poco menores a los hallados en nuestro estudio, probablemente relacionados con menores valores de pH en aquellos suelos.



**Figura 4.8** Fluctuación estacional de la actividad caseinasa para suelos cafetaleros bajo dos variedades en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo (El Laurel).

El análisis de correlación bivariado (anexo II), nos muestra que la actividad proteasica correlacionó significativa y positivamente ( $P < 0,01$ ) con la Rbas ( $r = 0,393$ ); COT ( $r = 0,456$ ); Ptsa ( $r = 0,359$ ); A.A ( $r = 0,346$ ); ureasa ( $r = 0,512$ ); NT ( $r = 0,312$ ); Ca ( $r = 0,432$ ); e inversamente con DAF ( $r = -0,347$ ). La correlación positiva y significativa de la actividad proteasa con varias de las variables evaluadas nos sugiere la gran importancia de esta enzima en la evaluación de la actividad bioquímica de los suelos bajo estudio. Kujur et al. (2012) también encontró correlación positiva y significativa de la actividad proteasa con COT ( $r = 0,89$ ); NT ( $r = 0,98$ ), resultados que están de acuerdo con nuestros hallazgos.

El incremento en la actividad proteasica está estrechamente relacionado con el aumento del COT y la acumulación de  $N-NH_4$  en el suelo (Sardans y Peñuelas, 2005; Kujur et al., 2012).

#### 4.6. CONCLUSIONES

Las actividades enzimáticas intracelulares DH, A.A y DAF, mostraron sensibilidad a los cambios por la época de muestreo, en suelos cafetaleros sembrados con dos variedades, Caturra y Catuaí, bajo sombra y sin aplicación de insumos agrícolas, en la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo “El Laurel”.

Entre estas actividades enzimáticas sensibles a la estacionalidad, sólo A.A mostró mayores valores en la estación seca, por lo tanto podemos sugerir que las actividades enzimáticas en los suelos objeto de nuestro estudio se ven favorecidas por las condiciones que se presentan en el suelo durante la estación lluviosa.

La A.A, mostro la mayor sensibilidad, al presentar diferencias significativas tanto por la época de muestreo como por el tipo de variedad de café, mientras la  $\beta$ -glucosidasa y la ureasa fueron las menos sensibles debido a que no mostraron diferencias significativas por época de muestreo ni por variedad, es posible que la poca variabilidad en la actividad enzimática de la  $\beta$ -glucosidasa y ureasa sea consecuencia del alto contenido de COT con poca variación entre los suelos estudiados.

La actividad ureasica, no fue sensible a los cambios ocasionados por la estacionalidad, ni por la variedad de café establecida en estos suelos, sin embargo, fue la enzima que mostró correlación significativa con la mayoría de propiedades bioquímicas, microbiológicas y fisicoquímicas estudiadas, lo cual permite sugerir la gran importancia del estudio de esta enzima para evaluar la calidad de estos suelos.

El análisis de correlación bivariado permite observar que la actividad proteasica correlacionó significativamente con varias de las propiedades químicas y bioquímicas estudiadas así como también con la Rbas, lo cual nos permite sugerir que esa enzima es importante para evaluar la calidad de los suelos estudiados.

## CAPITULO V

### INDICES DE CALIDAD DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ

#### 5.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés por la calidad del suelo, gracias a la creciente toma de conciencia sobre la importancia del suelo como componente de la biosfera, que funciona no solo en la producción de alimentos, fibras, madera y otros recursos forestales, sino también por su importancia en el mantenimiento de la calidad ambiental a nivel local, regional y mundial (Blonska y Januszek, 2013). La calidad del suelo depende de la combinación de un gran número de variables físicas, químicas, microbiológicas y bioquímicas. En las publicaciones disponibles se han presentado tres enfoques con respecto al uso de las propiedades del suelo para evaluar su calidad: (1) el uso de propiedades individuales; (2) el uso de índices sencillos y (3) el uso de índices complejos derivados de la combinación de diferentes propiedades del suelo (Blonska y Januszek, 2013). Tradicionalmente la fertilidad y calidad de los suelos se ha evaluado por medio del estudio de sus propiedades físicas y químicas, sin embargo las propiedades microbiológicas y bioquímicas son más sensibles y responden más rápido a los cambios que ocurren en el ambiente suelo (Trasar-Cepeda et al., 2000, 2008b; García et al., 2003).

Nannipieri et al. (1990) advirtieron sobre la dificultad de inferir mediante un solo valor de actividad enzimática el conocimiento del estado general de nutrientes de un suelo o determinar la actividad microbiológica del mismo. Mientras que Gil-Sotres et al. (1992) consideran que las mediciones simultáneas de varias enzimas si pueden resultar útiles como marcadores de bioactividad y pueden utilizarse como índices de fertilidad bioquímica de los suelos. En el mismo sentido Dick, (1994); Gil-Sotres et al. (2005) proponen el desarrollo de índices basados en la combinación de varias propiedades del suelo para evaluar su funcionamiento y calidad. Lo cual proporciona información integrada sobre los procesos y funcionamiento del suelo (Zornoza et al., 2015). Por otra parte, Trasar-Cepeda et al. (1998)

proponen una expresión matemática que combina propiedades microbiológicas y biológicas para indicar la calidad del suelo. Mientras que Andrews y Carroll (2001) y Andrews et al. (2002) consideran que los índices de calidad del suelo (ICS) ofrecen herramientas de decisión que ayudan a identificar prácticas de manejo sostenibles de los suelos. Un ICS apropiado debe tener tres componentes fundamentales: calidad ambiental, sostenibilidad agronómica y viabilidad socioeconómica (Andrews et al. 2002; Mukherjee y Lal, 2014).

Crear una herramienta universal para evaluar la calidad del suelo es muy difícil, porque las condiciones climáticas son muy diversas (Gil-Sotres et al., 2005). Como también son muy diversas las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y bioquímicas de los suelos y por ende el ambiente particular de cada tipo de suelo, influenciado además por el tipo de cultivo; el tipo de manejo y de explotación.

Generalmente en la agricultura se ha evaluado la calidad de los suelos enfocándola hacia la producción y rendimiento de los cultivos, descuidando otros factores importantes como la sostenibilidad de los sistemas productivos (calidad ambiental y la conservación de los suelos), en este capítulo, integramos las propiedades físicas, químicas, microbiológicas y bioquímicas de los suelos en estudio, utilizando herramientas matemáticas como la Media Geométrica (MG) y estadísticas multivariadas como el análisis de componentes principales (ACP o PCA por sus siglas en inglés), Análisis Canónico de Coordenadas Principales (ACCP o CAP por sus siglas en inglés), PERMANOVA Y PERMDISP, en ÍNDICES DE CALIDAD del suelo, que nos permitan evaluar su utilidad como indicadores apropiados de la calidad de estos suelos.

## **5.2. MATERIALES Y METODOS**

La descripción del sitio del experimento, el diseño experimental utilizado, así como toda la información sobre el muestreo del suelo, análisis de laboratorio se presentan en el capítulo II, secciones 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 y 2.3.5, respectivamente. El análisis de

laboratorio para las propiedades microbiológicas se describe en la sección 3.5.6 y el análisis de laboratorio para las propiedades bioquímicas se describe en la sección 4.4.6.

## **5.2.1. Análisis Estadístico**

### **5.2.1.1. PERMANOVA Y PERMDISP multivariado**

**Metodología:** Se realizó un PERMANOVA multivariado sobre la matriz de distancias euclidianas de todas las variables en conjunto, previamente normalizadas. También se aplicó un PERMDISP, utilizando la misma matriz, con el fin de comprobar la homogeneidad de dispersión multivariada, ya que el PERMANOVA es sensible a la falta de dispersión. Ambos análisis se realizaron solicitando 9999 permutaciones (Anderson et al., 2008).

### **5.2.1.2. Análisis Canónico de Coordenadas Principales (CAP o ACCP) (con las variables que mostraron diferencias significativas según PERMANOVA)**

**Metodología:** El Análisis Canónico de Coordenadas Principales (CAP por sus siglas en inglés, Canonical Analysis of Principal Coordinates), funciona como un análisis discriminante cuando la hipótesis se refiere a grupos diferenciados *a priori* (Anderson y Willis, 2003); éste análisis se utilizó para visualizar y cuantificar las diferencias entre los grupos definidos por la combinación de los factores variedad - estación climática, y obtener las variables que más contribuyen con la separación de los grupos en el espacio multivariado (Quinn y Keough, 2002; Anderson y Willis, 2003). Este análisis también fue realizado utilizando la matriz de distancias euclidianas de todas las variables previamente normalizadas y solicitando 9999 permutaciones.

### **5.2.1.3. Análisis de Componentes Principales (ACP o PCA)**

Se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP o PCA por su sigla en Inglés) sobre toda la data (que mostró diferencias significativas según PERMANOVA) con el fin de reducir dimensionalidad y determinar que variables son más importantes en la ordenación multivariada de las muestras (Anderson y Willis, 2003). Para todos los análisis, los datos fueron previamente normalizados (a cada observación se le resta la media y se divide este resultado por la desviación típica o en otras palabras los datos se transforman en una distribución de media cero y varianza 1) y se calcularon matrices de distancias euclidianas. Además se detectaron diferencias significativas para los resultados de los índices probados mediante PERMANOVA (Permutational multivariate analysis of variance) de dos (2) vías, previa comprobación del supuesto de homocedasticidad de dispersión multivariada mediante PERMDISP (Permutational analysis of multivariate dispersions) Anderson et al. (2008).

### **5.2.2. Selección de Indicadores**

La selección de los indicadores de calidad se puede simplificar por métodos estadísticos tales como: análisis de componentes principales (ACP o PCA), correlación múltiple y otras técnicas de agrupamiento estadístico (Andrews et al., 2002; Puglisi et al., 2006; Zornoza et al., 2007). Con fines de indexación, Andrews y Carroll (2001) y Andrews et al. (2002) proponen tres pasos (1) selección de los indicadores apropiados para un conjunto mínimo de datos (CMD), (2) transformación de los valores de los indicadores y (3) la combinación de las puntuaciones de los indicadores seleccionados en un índice.

En este trabajo, se utilizó dos métodos para seleccionar los indicadores del CMD. Se aplicó un ACP sobre todos los datos, para las variables que mostraron diferencias significativas según el PERMANOVA, logramos así reducir el número de variables, luego se ha tenido en cuenta el porcentaje de variación explicado por el componente principal

dividido entre la suma de la variación explicada por los componentes principales con autovalores  $> 1$ .

Se aplicó un análisis canónico de coordenadas principales (CAP o ACCP) basado en permutaciones, el cual funciona como un análisis discriminante cuando la hipótesis se refiere a grupos diferenciados *a priori* (Anderson y Willis, 2003), con el fin de buscar la combinación de las variables que mejor separa las variedades y épocas de muestreo (Quinn y Keough, 2002). En este caso para elaborar el CMD se escogió las variables que más le aportan al análisis canónico.

### **5.2.3. Índices de Calidad del Suelo**

La calidad del suelo es una combinación de propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales son capaces de cambiar rápidamente en respuesta a las variaciones de las condiciones del suelo (Brejda et al., 2000). De acuerdo a muchos autores (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997; Liebig et al., 2001) estas propiedades se agrupan en lo que se conoce como el conjunto mínimo de datos (CMD o MDS por sus siglas en inglés) el cual no es más que una colección de indicadores selectos capaces de medir el estado del suelo y sus funciones desde una parcela hasta escala regional (Karlen et al, 1997). La selección de propiedades del suelo para evaluar la calidad del mismo es crucial porque las conclusiones derivadas tienen poco significado si estos parámetros no son seleccionados rigurosamente (Nortcliff, 2002).

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas como indicadoras de calidad, de acuerdo a Doran y Parkin (1994) deben cumplir las siguientes condiciones:

- Descriptores de los procesos del ecosistema,
- Integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo,
- Reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieran medir,
- Ser sensibles a las variaciones de clima y manejo,
- Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables en diversas condiciones de campo,

Ser reproducibles,  
Ser fáciles de entender,  
Ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurran como resultado de la degradación antrópica,

Y, cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

La evaluación de la calidad del suelo es indispensable para determinar si un sistema de manejo es sustentable, a corto y largo plazo (Doran et al., 1994).

Un indicador de calidad del suelo se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características. Los indicadores se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un período dado (Astier-Calderón et al., 2002).

Independientemente del método usado, la indexación de la calidad del suelo sigue los siguientes pasos: 1) selección de los indicadores en un CMD; 2) interpretación y puntuación y 3) integración en un índice.

A continuación describiremos en detalle cada uno de los pasos (Andrews y Carroll, 2001 y Andrews et al., 2002)

Paso 1: Selección del indicador. Los indicadores potenciales de la calidad del suelo se seleccionan con base en su sensibilidad a las prácticas de manejo, habilidad para describir los mayores procesos edáficos, fáciles y de bajo costo de muestreo y análisis de laboratorio y su significancia en el incremento de la productividad agrícola y proteger las funciones medioambientales del suelo.

Se conocen dos métodos para la selección del conjunto mínimo de datos (CMD): opinión de expertos o herramientas estadísticas como regresión, análisis de componentes principales, etc. Un experto puede generar una lista apropiada de indicadores de calidad de suelos sobre la base de los procesos del ecosistema, funciones y otras decisiones como metas

de manejo para un sitio asociado a funciones del suelo así como otros factores específicos del sitio como sensibilidad del cultivo o regional como criterio de selección.

Paso 2: Puntuación de los indicadores. La transformación del conjunto de datos en puntuaciones adimensionales (curvas respuesta) en el intervalo de 0 y 1. Ésta puede ser por el uso de técnicas de puntuación lineal o no-lineal. Estudios previos (Andrews y Carroll, 2001 y Andrews et al., 2002) han demostrado que los métodos no lineales reportan valores más altos que los métodos lineales.

2.1 Curvas de respuesta lineales (Linear Scoring Functions, LSF). Las funciones pueden ser clasificadas en orden ascendente “más es mejor” u orden descendente “menos es mejor”. Para “más es mejor” el indicador se divide por el valor más alto del grupo, de este modo recibe una puntuación de 1. Para “menos es mejor” el menor valor observado se divide entre el valor de la observación. Esta aproximación ha sido usada por Liebig et al (2001); Sharma et al (2005, 2009).

Otra aproximación es la adoptada por Glover et al. (2000) y Masto et al. (2008) y esta descrita por las siguientes ecuaciones:

$$Y = \frac{(x-\min)}{(max-\min)} \text{ para un parámetro "más es mejor"}$$
$$\text{e } Y = 1 - \frac{(x-\min)}{(max-\min)} \text{ para un parámetro "menos es mejor"}$$

Donde Y es la puntuación lineal; x es el valor de la propiedad y min y max son los valores umbrales inferior y superior respectivamente. Para valores por debajo o encima de los umbrales la puntuación es cero.

2.2 Curvas de respuesta no lineales (Nonlinear Scoring Functions, NLSF). Estas curvas han sido descritas por Glover et al. (2000) y Andrews et al. (2004) y generadas por algún programa de computación como Curve-expert. La forma de la curva es sigmoide con una asíntota superior (para parámetros “mas es mejor”), sigmoide con asíntota inferior (para parámetros “menos es mejor”) y en forma de campana (para parámetros donde el punto medio es óptimo). La ecuación matemática más usada es la siguiente:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-b(x-A)}}$$

Donde x es el valor del indicador; A es el valor línea base o valor de la propiedad del suelo cuando la puntuación es igual a 0,5 y b es el valor de la pendiente.

Bastida et al. (2006) y Moreno et al. (2007) simplificaron esta función sigmoide a:

$$Y = a / (1 + (x/x_0)^b)$$

Donde a es el máximo valor de la función en este caso a = 1, x es la incógnita de la función, x<sub>0</sub> es el valor medio de cada parámetro en el conjunto de datos; esto centra la curva en un valor normalizado de 0,5; b es el valor de la pendiente de la ecuación y b = -2,5 para parámetros “más es mejor” y b = 2,5 para parámetros “menos es mejor”.

Paso 3: Indexación de la calidad del suelo. Los índices de calidad del suelo son herramientas de decisión que combinan eficazmente una variedad de información para la toma de decisiones multipropósitos (Karlen y Stott, 1994; Andrews et al., 2002). Cuando los objetivos de manejo se enfocan en la sostenibilidad, en lugar del simple rendimiento del cultivo, un índice de calidad del suelo (ICS) puede ser visto como un componente importante dentro de la jerarquía de sostenibilidad del agroecosistema. El ICS es un factor que contribuye a la evaluación de los objetivos de manejo sostenible al más alto nivel (Andrews et al., 2002).

La mayoría de los artículos revisados utilizan la misma metodología para establecer ICS. Se basan en la puntuación y ponderación de diferentes indicadores de la calidad del suelo, seleccionados por medio de análisis multivariados (Zornoza et al., 2015). El Índice de Calidad de Suelos es la sumatoria de las puntuaciones de las variables. Dicha sumatoria es analizada mediante ANOVA o PERMANOVA para determinar diferencias entre tratamiento y manejo. Se asume que una puntuación alta significa una mejor calidad de suelo.

En la literatura se describen dos métodos; el primero es un índice aditivo y otro aditivo ponderado; en el primer caso se suman la puntuación de cada indicador individual del CMD y luego se divide entre el número total de indicadores:

$$ICS = \sum_{i=1}^n Si/n$$

En el caso de una suma ponderada; el factor de ponderación cuando la selección del CMD se hace por análisis de componentes principales es usando el porcentaje de variación explicado por el componente principal dividido entre la suma de la variación explicada por los componentes principales con autovalores  $> 1$ .

$$\text{ICS-ACP} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i$$

Donde  $w_i$  es el factor de ponderación y  $S_i$  es el valor del indicador calculado con las curvas respuesta (Sharma et al., 2005; 2008).

Algunos autores como Bastida et al (2006) y Moreno et al (2007) usan como factor de ponderación los factores de carga del primer componente principal.

En este trabajo hemos elaborado ocho (8) índices de calidad del suelo; cinco (5) índices a partir del ACP, así:

LA – ACP (lineal aditivo simple)

LP – ACP (lineal aditivo ponderado)

ACP-Sigmoidal simple (sigmoidal aditivo simple)

ACP-Sigmoidal ponderado (sigmoidal aditivo ponderado)

MG – ACP (media geométrica – ACP).

Tres (3) índices a partir de los resultados con el CAP:

LA – CAP (lineal aditivo)

SA – CAP (sigmoidal aditivo)

MG – CAP (media geométrica – CAP)

### **5.2.3.1. Aplicación del análisis de componentes principales (ACP)**

Esta técnica de análisis multivariado fue desarrollada por Pearson a finales del siglo XIX y posteriormente fue estudiada por Hotelling en los años 30 del siglo XX. Estudia las

relaciones que se presentan entre  $p$  variable correlacionadas transformando el conjunto original de variables en otro conjunto de variables incorrelacionadas entre sí (Ortogonales); llamadas componentes principales. Estas nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra.

El objetivo del ACP es reducir o simplificar la dimensionalidad del conjunto de datos y determinar que variables son más importantes en la ordenación multivariada de las muestras (Anderson y Willis, 2003).

Para la selección del conjunto mínimo de datos (CMD) se realizó el ACP sobre aquellas variables que mostraron diferencias significativas entre las variedades (Catuaí, Caturra) y época de muestreo (seca y lluvia). Las variables fueron estandarizadas (sustrayendo la media y luego dividir por la desviación estándar) y se usó la matriz de correlación como datos de entrada.

Solo se retuvieron componentes principales (CP) con autovalores  $> 1$  o que expliquen por lo menos el 5% de la variación total explicada, cuando menos de 3 CPs tienen autovalores  $\geq 1$  (Wander y Bollero, 1999; Andrews et al., 2002; Sharma et al., 2005, 2008). El CMD se forma con aquellas variables con una carga factorial en el componente principal  $\geq 0,65$  para un tamaño muestral de 70 (Hair et al., 2005). Cuando más de una variable se retiene en un componente principal dado, se usa la correlación multivariada para determinar si las variables podrían ser consideradas como redundantes y de esta manera pueden ser eliminadas del índice de calidad de suelos. Dicho valor se fijó en  $r > 0,60$  de acuerdo a Andrews et al. (2002) y Andrews y Carroll (2001). Además del criterio anterior para la selección de variables incorrelacionadas se considera la suma de los coeficientes de correlación lineal para retener una variable en el componente principal y es que esta tenga el valor más alto.

Después de la selección de las variables que constituyen el CMD, cada observación de cada indicador se transforma a través de curvas respuesta que pueden ser lineales

(Andrews et al., 2002) o no lineales como curvas sigmoidales (Glover et al., 2000; Bastida et al., 2006; Masto et al., 2007; 2008; Moreno et al., 2008; Cherubin et al., 2016).

Una vez transformadas las variables del CMD para cada observación son ponderadas usando los resultados del ACP. Cada CP explica un cierto porcentaje (%) de la variación total del conjunto de datos. Este porcentaje dividido por el porcentaje total de variación explicada por todos los CP con autovalores  $> 1$ ; suministra la ponderación para las variables escogidas bajo un dado CP.

De este modo el índice de calidad de suelo se calcula como una suma ponderada con la siguiente fórmula:

$$\text{ICS-ACP}_{\text{AP}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i$$

Donde  $w_i$  es el peso o factor de ponderación derivado del ACP y  $S_i$  es la puntuación del indicador en la curva respuesta. Un alto valor del índice significa una mejor calidad o mejor performance de la función del suelo.

### **5.2.3.2. Aplicación del análisis canónico de coordenadas principales (ACCP o CAP)**

El ACCP surge por la necesidad de un método flexible para reducir la ordenación de datos sobre la base de cualquier medida de distancia o disimilitud, que mostrará la nube de puntos multivariados cuando se refiere a una hipótesis especificada a priori. Este método permite descubrir patrones que están enmascarados en un conjunto de datos no reducido, aplica pruebas canónicas utilizando permutaciones y se puede utilizar para: a) poner una nueva observación en el espacio canónico utilizando sólo diferencias entre puntos, b) para clasificar las observaciones y obtener el error residual y c) para correlacionar las variables originales con los patrones o modelos sobre diagramas canónicos (Anderson y Willis, 2003).

El Análisis Canónico de Coordenadas Principales (CAP o ACCP), se utilizó para visualizar y cuantificar las diferencias entre los grupos definidos por la combinación de los

factores variedad – estación climática, y obtener las variables que más contribuyen con la separación de los grupos en el espacio multivariado (Anderson y Willis 2003). Este análisis fue realizado utilizando la matriz de distancias euclidianas de todas las variables que mostraron diferencias significativas, previamente normalizadas y solicitando 9999 permutaciones. Se escogió una correlación de Pearson  $r = 0,65$  porque al aplicar PERMANOVA a las variables que mejor le aportan a la discriminación entre grupos para  $r \geq 0,65$  se obtuvo mejor diferencias entre grupos (diferencias significativas entre variedades y por estación climática).

### **5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **5.3.1. PERMANOVA Y PERMDISP multivariado**

El PERMANOVA mostró diferencias en cuanto a la variedad y a la época de muestreo ( $p < 0.001$ ), sin embargo el término de la interacción no fue significativo ( $p > 0.05$ ) (Tabla 5.1), de tal manera que el efecto de la variedad sobre el patrón multivariado de los suelos es independiente de la estacionalidad, y viceversa. Por otro lado, la prueba de dispersión multivariada (PERMDISP) no resultó significativa para ninguno de los factores evaluados, ni para la interacción ( $p > 0.05$ ), indicando que las diferencias multivariadas encontradas en el PERMANOVA se deben a los efectos de la variedad y época de muestreo (Tabla 5.1).

#### **5.3.2. Análisis de Componentes Principales (ACP) E Índices de Calidad del Suelo**

En la Tabla 5.2 se muestra los resultados de los tests de Kaiser-Meyer-Olkin y de esfericidad de Bartlett. La prueba de KMO contrasta la magnitud de los coeficientes de correlación parcial y varía entre 0 y 1. En nuestro caso el valor es de 0,717, el cual se considera como aceptable y se puede realizar el análisis de componentes principales.

La prueba de esfericidad de Bartlett contrasta la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones es una matriz identidad, en cuyo caso no existirían correlaciones significativas entre las variables. Como la significancia es  $0,000 < 0,05$ ; es altamente significativa con lo cual el análisis de componentes principales es pertinente o apropiado.

**Tabla 5.1** PERMANOVA y PERMDISP multivariado sobre los datos normalizados y distancias euclidianas, para todas las variables evaluadas.

PERMANOVA						
Source	df	SS	MS	Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i> <sub>(perm)</sub>	Unique perms
Variedad	1	274,61	274,61	12,63	0,0001	9930
Estación	1	273,04	273,04	12,55	0,0001	9928
Variedad*Estación	1	32,25	32,25	1,482	0,1213	9910
Residual	68	1479,1	21,75			
Total	71	2059				

PERMDISP				
Source	df1	df2	F	<i>P</i> <sub>(perm)</sub>
Variedad	1	70	0,025	0,87
Estación	1	70	0,012	0,91
Variedad*Estación	3	68	0,32	0,83

**Tabla 5.2** Test KMO y Bartlett

Adecuacion del tamaño de la muestra Kaiser-Meyer-Olkin		0,717
Test de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aprox.	921,987
	Grados de libertad	171
	Significancia	3,01E-10 <sup>3</sup>

En la Tabla 5.3 recoge en porcentajes individuales y acumulados la proporción de varianza explicada por cada factor para la solución no rotada.

**Tabla 5.3** Autovalores y Varianza explicada por componentes principales con autovalores >1.

Componente Principal	Autovalores iniciales	Varianza	
	Total	% de varianza	% Acumulada
1	5,19	27,31	27,31
2	3,52	18,51	45,82
3	2,88	15,18	61,00
4	1,21	6,39	67,39
5	1,06	5,57	72,96

El ACP se realizó sobre 19 variables que mostraban diferencias significativas entre los tratamientos y se extrajeron cinco componentes principales con autovalores > 1; los cuales explican aproximadamente un 73 % de la varianza total de los datos (Tabla 5.3).

La Tabla 5.4 muestra la matriz de componentes, en la cual se observa la correlación de las variables originales y los componentes principales.

En la Tabla 5.4 vemos que en el primer componente principal las variables con mayores puntuaciones factoriales fueron COT, CICR, NT, PT y K. El NT se descarta por su alta correlación con el COT ( $r = 0,838$ ) entonces resulta redundante y se retienen por su suma de los coeficientes CICR, PT y K (Tabla 5.5).

**Tabla 5.4** Matriz de componentes y comunalidades.

Variable	Componente Principal					Comunalidades
	1	2	3	4	5	
Zscore(COT)	<u>0,800</u>		0,413			0,774
Zscore(CICR)	<u>0,755</u>					0,735
Zscore(NT)	<u>0,700</u>		0,456			0,866
Zscore(PT)	<u>0,685</u>	-0,413				0,772
Zscore(K)	<u>0,670</u>					0,718
Zscore(Pasim)	0,640	-0,474				0,701
Zscore(Limo)	-0,595		0,521			0,359
Zscore(Arena)	0,577					0,891
Zscore(Fosfatasa)	0,565		0,401	0,409		0,849
Zscore(DH)		<u>0,894</u>				0,625
Zscore(Mg)	0,406	<u>0,760</u>				0,701
Zscore(DAF)		<u>0,677</u>				0,820
Zscore(CE)		0,587	0,451			0,631
Zscore(RB)		-0,517			0,467	0,811
Zscore(Caseinasa)			<u>0,658</u>			0,625
Zscore(pH)	-0,590		0,593			0,819
Zscore(AIH)	0,440		-0,586			0,790
Zscore(Arginasa)			0,583			0,715
Zscore(Na)				<u>0,736</u>		0,659

Método de Extracción : Análisis de Componentes Principales

**Tabla 5.5** Coeficientes de correlación entre las variables con alta carga factorial en el primer componente principal.

	COT	CICR	NT	PT	K
COT	1,000	0,535	0,838	0,569	0,552
CICR	0,535	1,000	0,460	0,376	0,551
Nt	0,838	0,460	1,000	0,492	0,445
Pt	0,569	0,376	0,492	1,000	0,248
K	0,552	0,551	0,445	0,248	1,000
Suma	3,944	2,922	3,235	2,685	2,796

En el segundo componente principal tenemos tres variables DH, Mg y DAF y las correlaciones entre esas variables se encuentran en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6** Coeficientes de correlación entre las variables con alta carga factorial en el segundo componente principal.

	DH	Mg	DAF
DH	1,000	0,850	0,619
Mg	0,850	1,000	0,463
DAF	0,619	0,463	1,000
Suma de correl.	2,469	2,313	2,082

Se descartan tanto el Mg como el DAF por sus altas correlaciones con la DH  $r = 0,850$  y  $0,619$ , respectivamente (Tabla 5.6).

En el tercer componente principal tenemos solo a la caseína. En el cuarto componente solo el sodio intercambiable muestra una alta carga factorial.

De este modo el índice de calidad de suelos quedaría como:

ICS- LP-ACP (lineal aditivo ponderado):

$$\text{ICS- LP-ACP} = 0,374 (\text{COT})_n + 0,374 (\text{CICR})_n + 0,374 (\text{Pt})_n + 0,374 (\text{K})_n + 0,254 (\text{DH})_n + 0,208 (\text{Cas})_n + 0,088 (\text{Na}_{\text{int}})_n$$

Índice de calidad del suelo lineal aditivo simple ICS- LA-ACP =  $\sum_{i=1}^n S_i/n$

$$\text{ICS- LA-ACP} = [(\text{COT})_n + (\text{CICR})_n + (\text{Pt})_n + (\text{K})_n + (\text{DH})_n + (\text{Cas})_n + (\text{Na}_{\text{int}})_n]/7$$

ICS a partir de resultados del ACP con puntuaciones de los indicadores transformados usando curvas respuesta Sigmoidal (Nonlinear Scoring Functions, NLSF):

Sigmoidal aditivo simple (Sigmoidal)

$$\text{ICS-ACP}_{\text{Sigmoidal}} = [(\text{COT})_{\text{ns}} + (\text{CICR})_{\text{ns}} + (\text{Pt})_{\text{ns}} + (\text{K})_{\text{ns}} + (\text{DH})_{\text{ns}} + (\text{Cas})_{\text{ns}} + (\text{Na}_{\text{int}})_{\text{ns}}]/7$$

Sigmoidal aditivo ponderado (Sig. pond.)

$$\text{ICS-ACP-sig. pond.} = 0,374 (\text{COT})_{\text{ns}} + 0,374 (\text{CICR})_{\text{ns}} + 0,374 (\text{Pt})_{\text{ns}} + 0,374 (\text{K})_{\text{ns}} + 0,254 (\text{DH})_{\text{ns}} + 0,208 (\text{Cas})_{\text{ns}} + 0,088 (\text{Na}_{\text{int}})_{\text{ns}}$$

Donde n = dato normalizado; ns = dato normalizado y aplicando curva sigmoidal.

### 5.3.3. Análisis Canónico de Coordenadas Principales (ACCP o CAP) (con todas las variables que mostraron diferencias significativas según PERMANOVA)

El CAP (ACCP), mostró una correlación canónica de los dos primeros ejes razonablemente alta (CAP 1 = 0,96; CAP 2 = 0,86) aunque el análisis arroja un tercer eje con menor correlación (Tabla 5.7); esta correlación canónica representa la fuerza de la asociación entre la nube de puntos en el espacio multivariado y la hipótesis de diferencias entre grupos. El CAP utilizando las variables seleccionadas reveló que los primeros 9 ejes de coordenadas principales explican el 89,86 % de la variación en la ordenación multivariada (Tabla 5.8).

**Tabla 5.7.** Análisis de correlación canónica

Eigenvalue	Correlation	Corr.Sq.
1	0,965	0,9312
2	0,8579	0,7359
3	0,6409	0,4107

**Tabla 5.8.** Ejes de coordenadas principales (*m*).

<i>m</i>	prop.G	ssres	d_1^2	d_2^2	d_3^2	%correct
1	0,2769	2,4658	0,5895	0	0	50
2	0,4742	1,7477	0,8674	0,4631	0	81,944
3	0,6131	1,6242	0,8827	0,6083	0,0021	86,111
4	0,6961	1,621	0,9056	0,6103	0,0264	86,111
5	0,7505	1,5555	0,9139	0,6477	0,0757	87,5
6	0,7958	1,5904	0,9165	0,6533	0,1127	87,5
7	0,8337	1,4289	0,9277	0,6549	0,3001	84,722
8	0,8675	1,2766	0,928	0,6565	0,4087	86,111
9	0,8986	1,1825	0,9312	0,7359	0,4107	94,444
10	0,9233	1,1969	0,9472	0,7359	0,4157	91,667
11	0,9407	1,2272	0,9481	0,7374	0,416	90,278
12	0,9555	1,3123	0,9486	0,7407	0,4162	93,056
13	0,9668	1,3102	0,9487	0,7409	0,4402	93,056
14	0,9766	1,3343	0,9507	0,741	0,4491	91,667
15	0,9852	1,4053	0,9515	0,7484	0,4493	88,889
16	0,9908	1,4327	0,9515	0,7488	0,4749	88,889
17	0,9955	1,4399	0,954	0,7665	0,4754	88,889
18	1	1,2972	0,9541	0,8001	0,5296	86,111

Abreviaturas: *m*= número de ejes; prop.G= proporción de la variación explicada en la nube de datos descrita por la matriz de similaridad; ssres= suma de cuadrados residual dejando una asignación de las observaciones de los grupos fuera; d\_1^2 – d\_3^2 = tamaño del primer, segundo y tercer eje de correlación canónica al cuadrado; %correct= porcentaje de clasificación correcta dejando una asignación de las observaciones de los grupos fuera.

El análisis clasificó correctamente el 94,44 % de las muestras (68/72 muestras), la validación cruzada de esta prueba mostró que las características del suelo de la variedad Catuaí en la estación lluviosa obtuvo una perfecta clasificación (100 %), mientras que para la estación seca fue del 94,4 %. La clasificación de la variedad Caturra fue del 94,4 % y 88,9 % para las estaciones lluviosa y seca respectivamente (Tabla 5.9).

**Tabla 5.9.** Validación cruzada dejando una asignación de las observaciones de los grupos fuera (para la elección de  $m$ : 9).

Grupo original	Catuai seca	Caturra seca	Catuai lluvia	Caturra lluvia	Total	% correcto
Catuai seca	17	1	0	0	18	94,4
Caturra seca	2	16	0	0	18	88,9
Catuai lluvia	0	0	18	0	18	100
Caturra lluvia	0	0	1	17	18	94,4

$m$ : ejes de coordenadas principales

La discriminación entre grupos puede ser observada en la ordenación multivariada de la Figura 5.1 donde las variables que más aportan a la discriminación, con base en los vectores que tienen un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,65 fueron: variables bioquímicas (DH y DAF), microbiológicas (Rbasal) y fisicoquímicas (pH, COT, Mg, CIC R y CE). En la relación de los vectores con la ordenación se observa que el COT y el pH en menor grado, son las variables que más contribuyen con la separación entre las variedades (CAP 2), mientras que DH, DAF y Mg contribuyen a la discriminación por época climática (CAP 1); por su parte la Rbasal, CE y CIC R, parecieran ejercer una influencia similar en la ordenación para ambos ejes canónicos.

El estadístico traza indica que el CAP fue significativo ( $\text{tr}(Q\_m'HQ\_m)$ : 2,07785;  $P$ : 0,0001).

Los ICS a partir del CAP quedarían así:

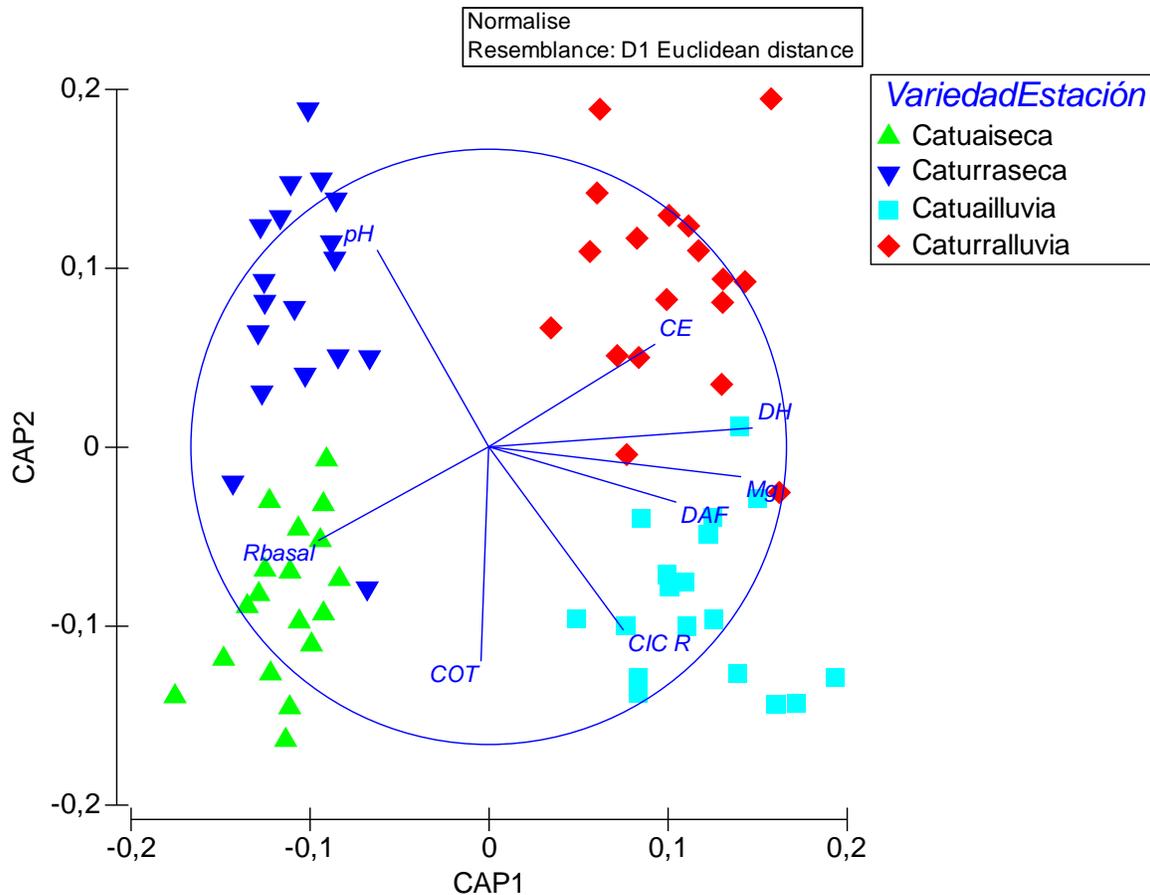
ICS-Análisis canónico de coordenadas principales aditivo lineal (ICS - LA-CAP)

$$\text{ICS - LA-CAP } (r=0,65) = [(COT)_n + (CICR)_n + (DAF)_n + (Mg)_n + (DH)_n + (CE)_n + (Rbas)_n + (pH)_n]/8$$

ICS-Análisis canónico de coordenadas principales aditivo Sigmoidal (ICS - SA-CAP)

$$\text{ICS - SA-CAP } (r=0,65) = [(COT)_{ns} + (CICR)_{ns} + (DAF)_{ns} + (Mg)_{ns} + (DH)_{ns} + (CE)_{ns} + (Rbas)_{ns} + (pH)_{ns}]/8$$

Donde  $n$  = dato normalizado;  $ns$  = dato normalizado y aplicando curva sigmoidal.



**Figura 5.1** Ordenación multivariada del Análisis Canónico de Coordenadas Principales, se muestran los vectores con mayores coeficientes de correlación de Pearson ( $r > 0,65$ ).

### 5.3.4. Índices usando la media geométrica (MG)

Índice de calidad del suelo (ICS) aplicando la media geométrica (MG) a las variables seleccionadas por ACP. Para determinar este índice se escogió las variables seleccionadas por el ACP, a la multiplicación de los valores originales para cada una de estas, se calculó la raíz del número de la selección, mediante la siguiente ecuación:

$$MG = \sqrt[7]{(COT \times CICR \times Pt \times K \times DH \times Cas \times Na)}$$

MG de variables seleccionadas por ACP. Las variables representan sus valores netos.

Índice de calidad del suelo (ICS) aplicando la media geométrica a las variables seleccionadas por análisis canónico de coordenadas principales (discriminante) (MGd) aplicado sólo a variables que mostraron diferencias significativas:

$$MGd = \sqrt[8]{(COT \times CICR \times DAF \times DH \times Rbas \times Mg \times pH \times CE)}$$

MG de variables seleccionadas por CAP. Las variables representan sus valores netos.

Para estos ocho (8) índices se asume que un mayor valor o puntuación en el índice significa una mejor calidad o mayor rendimiento de la función del suelo.

### 5.3.5. Comparación de los Índices de Calidad de Suelos

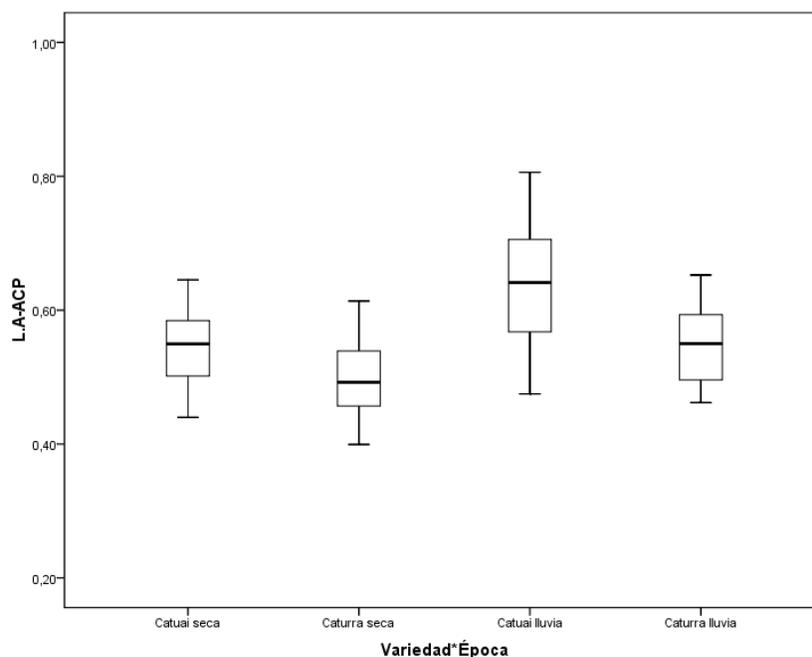
Los resultados del PERMANOVA y PERMDISP realizados sobre cada uno de los índices se observan en la Tabla 5.10. Los resultados del PERMANOVA para los índices aditivo lineal (ICS – LA-ACP) y Sigmoidal (ICS – ACP<sub>sigmoidal</sub>) con las variables seleccionadas por ACP muestran diferencias significativas tanto para la variedad como para la época climática ( $p < 0,001$  para ambos índices y factores), igualmente ambos índices mostraron los mayores valores con la variedad Catuaí y en la época lluviosa (Figuras 5.2 y 5.3), mientras que los índices ponderados con las variables seleccionadas por ACP (LP-ACP y ACP-Sigm pond), sólo indicaron diferencias significativas para las variedades ( $p < 0,001$  en ambos índices), observándose mayores valores con la variedad Catuaí (figura 5.4 y 5.5). El PERMDISP no mostró diferencias significativas, por lo tanto se asume que las diferencias por las variedades son intrínsecas a este factor (Tabla 5.10).

**Tabla 5.10** PERMANOVA y PERMDISP univariados de los índices de calidad de suelo, a partir de los datos normalizados y 9999 permutaciones.

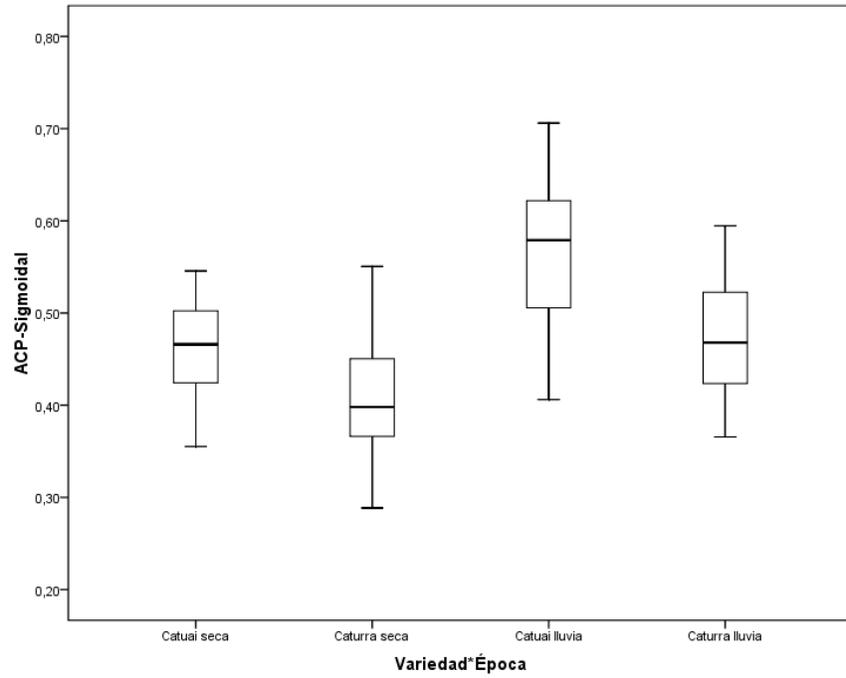
Índices	PERMANOVA			Permdisp		
	Variedad	Época	Interacción	Variedad	Época	Interacción
L.A-ACP	***	***	ns	ns	*	ns
ACP-Sigmoidal	***	***	ns	ns	*	ns
L.P-ACP	***	ns	ns	ns	ns	ns
ACP-Sig. pond.	***	ns	ns	ns	ns	ns
L.A-CAP (r=0,65)	***	**	ns	ns	*	ns
S.A-CAP (r=0,65)	***	***	ns	ns	*	ns
MG-ACP	***	***	ns	ns	ns	ns
MG-CAP (r=0,65)	**	***	*	ns	**	ns

MG: Media geométrica; ns= no significativo; \* p<0,05; \*\* p<0,01; \*\*\* p<0,001.

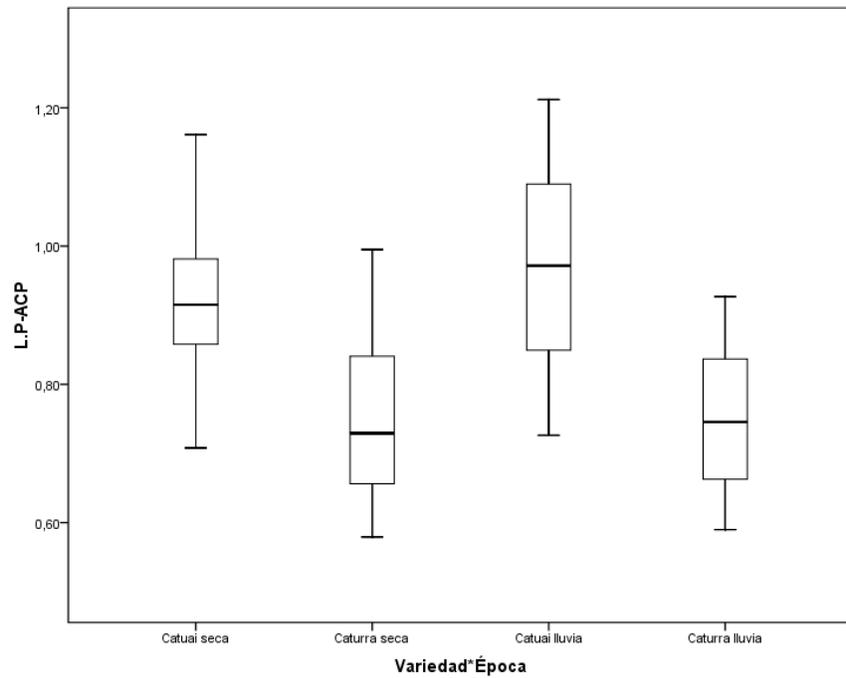
L.A-ACP: lineal aditivo para variables seleccionadas por ACP; ACP-Sigmoidal: Sigmoidal aditivo para variables seleccionadas por ACP; L.P-ACP: : lineal ponderado para variables seleccionadas por ACP; ACP<sub>Sigm pond</sub>: Sigmoidal ponderado para variables seleccionadas por ACP; L.A-CAP (r=0,65): lineal aditivo para variables seleccionadas por CAP; S.A-CAP (r=0,65): sigmoidal aditivo para variables seleccionadas por CAP; MG-ACP: media geométrica para variables seleccionadas por ACP; MG-CAP (r=0,65): media geométrica para variables seleccionadas por CAP.



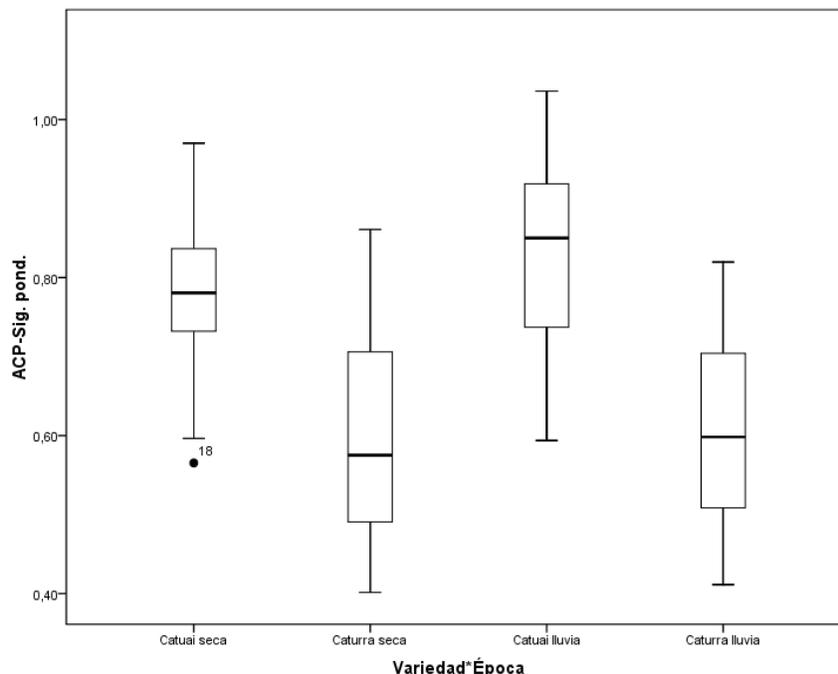
**Figura 5.2** Índice aditivo lineal (ICS – LA-ACP)



**Figura 5.3** Índice aditivo sigmoidal ACP (ICS – ACP-sigmoidal)

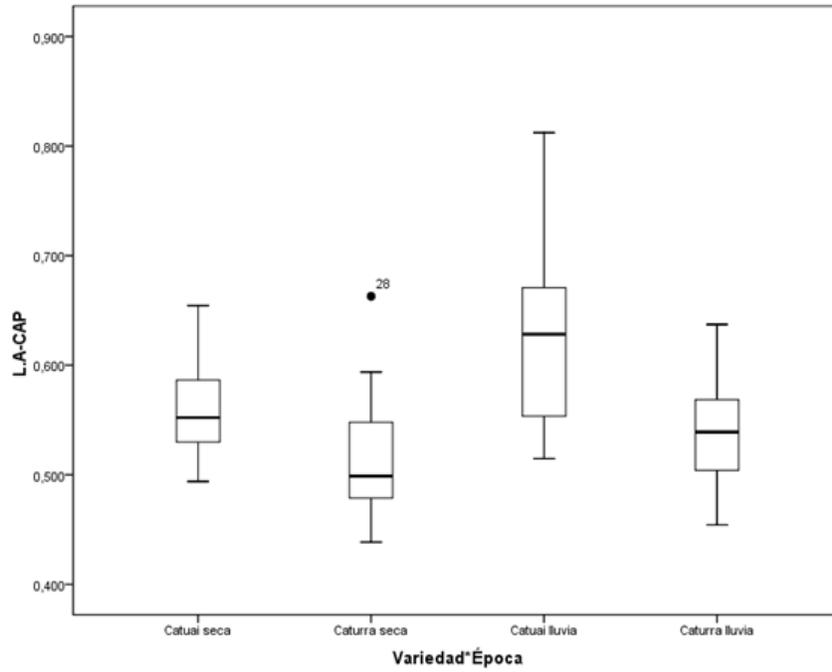


**Figura 5.4** Índice aditivo lineal ponderado ACP (ICS – LP-ACP)

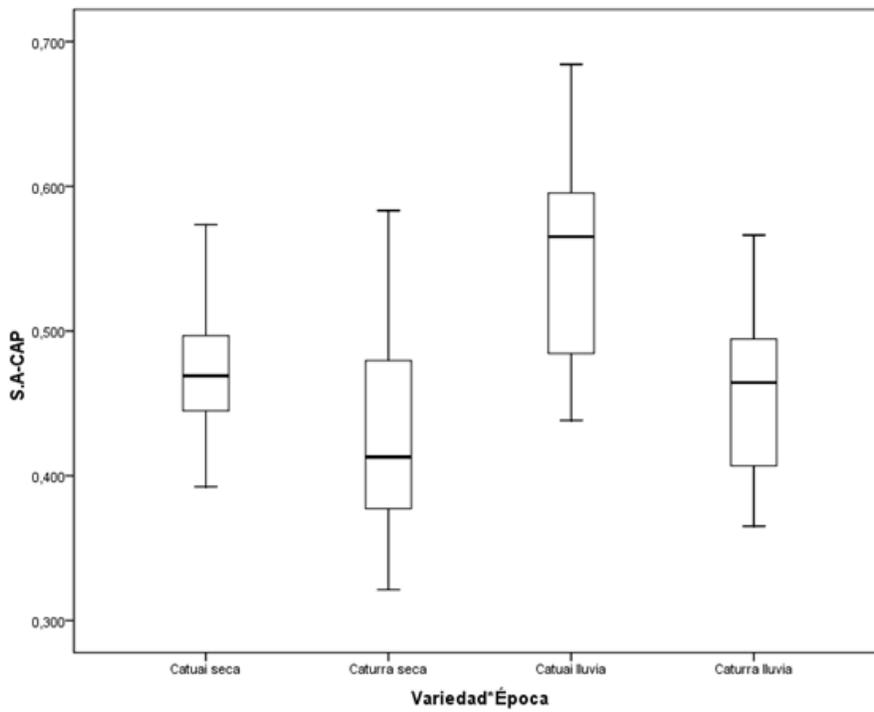


**Figura 5.5** Índice aditivo sigmoidal ponderado ACP (ICS – ACP-Sig.pond)

Los resultados del PERMANOVA para los índices aditivo lineal CAP (ICS – LA-CAP) y aditivo sigmoidal CAP (ICS – sigmoidal-CAP) con las variables seleccionadas por CAP se observan diferencias significativas tanto para la variedad como para la época climática ( $p < 0,001$  para ambos índices y factores), igualmente ambos índices mostraron los mayores valores con la variedad Catuai y en la época lluviosa (figuras 5.6 y 5.7). Estos resultados indican las mismas tendencias a los resultados obtenidos para los índices aditivo lineal y aditivo sigmoidal desarrollados a partir de los ACP.



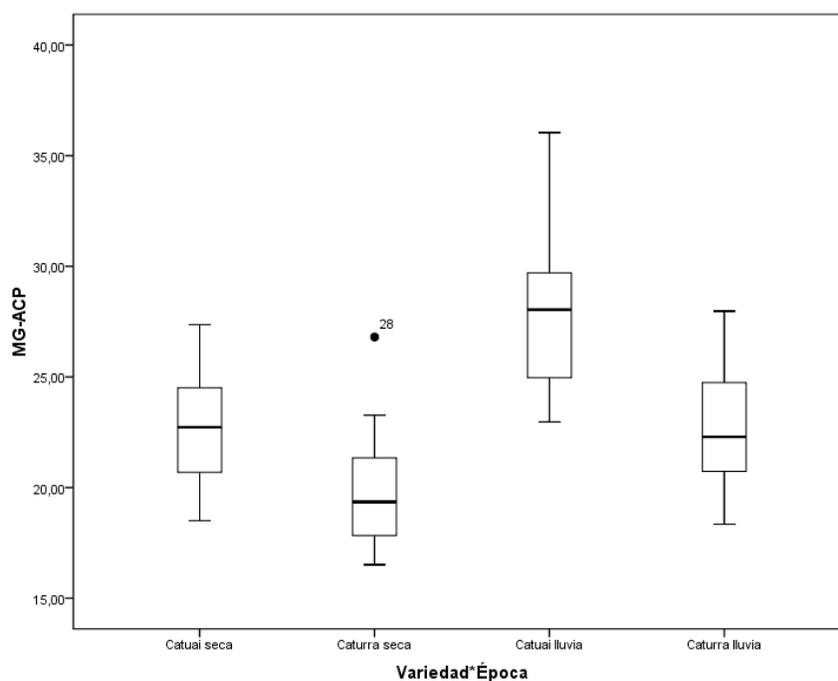
**Figura 5.6** Índice lineal aditivo CAP (ICS – LA-CAP)



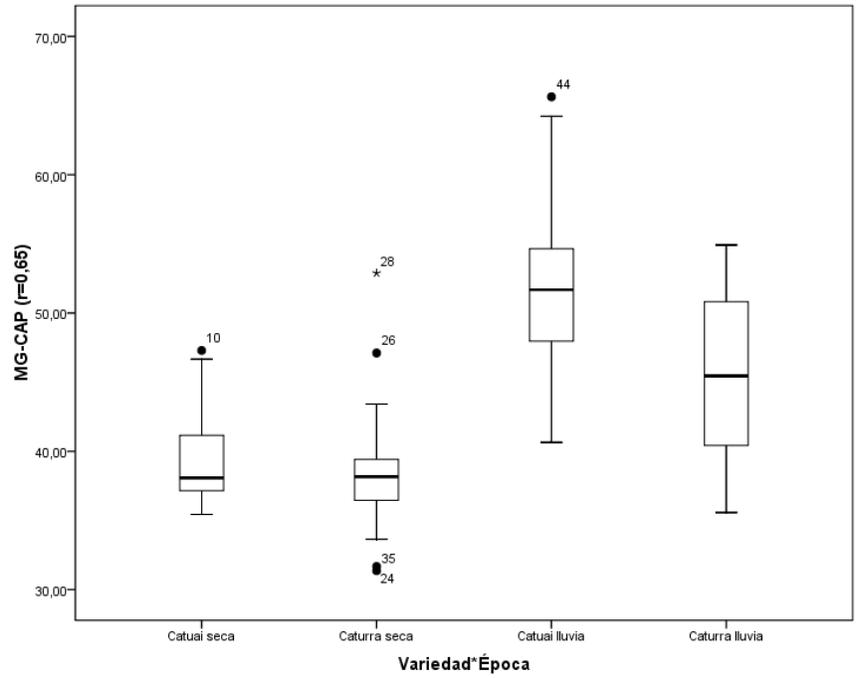
**Figura 5.7** Índice sigmoidal aditivo CAP (ICS – SA-CAP)

El PERMANOVA demostró que el índice de la media geométrica con variables seleccionadas por ACP (MG – ACP) presenta diferencias significativas tanto por la variedad ( $p < 0,001$ ) como por la época climática ( $p < 0,001$ ), el PERMDISP no fue significativo ( $p > 0,05$ ), lo cual indica que las diferencias detectadas se deben a los factores. Este índice presentó los mayores valores en la variedad Catuaí y en la estación lluviosa (Figura 5.8).

El análisis PERMANOVA aplicado al índice media geométrica con variables seleccionadas por CAP (MG – CAP) mostró el mismo patrón de diferencias significativas tanto por variedad como por época climática, sin embargo también se detectó interacción significativa entre ambos factores. Además en este índice se observó dispersión multivariada por época climática, lo que indica que puede haber otros factores que introducen alta dispersión en la época climática (Figura 5.9).



**Figura 5.8** Índice media geométrica ACP (ICS – MG-ACP)



**Figura 5.9** índice media geométrica CAP (ICS – MG-CAP)

## 5.4. CONCLUSIONES

Los resultados de los ICS desarrollados a partir de las variables que dieron diferencias significativas indican una tendencia similar tanto para los ICS desarrollados con las variables elegidas a partir del Análisis de Componentes Principales (ACP): variables bioquímicas: Deshidrogenasa, Diacetato de fluorisceina y Caseinasa; fisicoquímicas: Carbono Orgánico Total, Capacidad de Intercambio Cationico Real, Nitrógeno Total, Fosforo Total, Potasio, Magnesio, sodio; como para los ICS desarrollados a partir de las variables que más aportan a la discriminación en el Análisis Canónico de Coordenadas Principales (CAP) (con base en los vectores que tienen un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,65 fueron: variables bioquímicas: Deshidrogenasa y Diacetato de fluorisceina; microbiológicas: Respiración basal y fisicoquímicas: pH, Carbono Orgánico Total, Capacidad de Intercambio Cationico Real, Magnesio y Conductividad eléctrica); mostrando diferencias significativas, con los mayores valores para los suelos con la variedad Catuaí e igualmente mayores valores en la estación lluviosa para ambas variedades, lo cual nos permite sugerir que la variedad Catuaí promueve el desarrollo de propiedades fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas, que redundan en mejor calidad del suelo, comparada con la variedad Caturra.

Los métodos en los que se usa ponderación de los resultados para desarrollar ICS a partir de los hallazgos obtenidos por ACP, parecen ser los menos sensibles ya que con dichos métodos sólo se observan diferencias significativas por variedades más no por época climática.

Los resultados de los ICS obtenidos a partir de la MG con las variables elegidas a partir del ACP y del CAP desarrollados con las mismas variables que mostraron diferencias significativas según PERMANOVA; indicaron iguales tendencias que los índices lineal aditivo y Sigmoidal aditivo desarrollados a partir de esas mismas variables, seleccionadas tanto por ACP como por CAP. Observando diferencias significativas, con mayores valores para los suelos con la variedad Catuaí e igualmente mayores valores en la estación lluviosa para ambas variedades.

Los resultados obtenidos nos permiten sugerir que los análisis estadísticos aplicados para la selección del CMD y desarrollo de los diferentes ICS resultaron sensiblemente apropiados para tal fin, y se pueden recomendar como herramientas útiles para la selección del CMD y desarrollo de ICS.

En esta investigación se evaluaron 29 variables: 7 variables bioquímicas, 2 microbiológicas, 3 ecofisiológicas y 17 variables fisicoquímicas. Después de aplicar los análisis estadísticos PERMANOVA Y PERMDISP, en el Análisis de Componentes Principales se observó que luego de descartar las variables redundantes por alta correlación, las variables con mayores puntuaciones factoriales fueron: DH, Caseinasa, COT, CICR, PT, K y Na; razón por la cual fueron seleccionadas para desarrollar los ICS con base en el ACP.

Al aplicar el Análisis Canónico de Componentes Principales (ACCP o CAP) sobre las variables que mostraron diferencias significativas según el PERMANOVA Y PERMDISP, se pudo ver que las variables con mayor aporte a la discriminación con base en los vectores que tienen coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,65 fueron: DH, DAF, Rbas, pH, COT, Mg, CICR y CE. En la relación de los vectores con la ordenación se observa que el COT y el pH en menor grado, son las variables que más contribuyen con la separación entre variedades; DH, DAF y Mg contribuyen a la discriminación por época climática, mientras que Rbas, CE y CICR parecen contribuir por igual para ambos ejes canónicos.

Los ICS desarrollados a través de las herramientas estadísticas seleccionadas sugieren que si el manejo de los agroecosistemas estudiados permanece igual en el tiempo, en el futuro sólo sería necesario evaluar las variables seleccionadas: DH, DAF, Caseinasa, Rbas, COT, CICR, pH, CE, PT, Mg, K y Na para conocer la evolución de la sostenibilidad de dichos suelos. Si en el futuro los valores calculados aplicando estos ICS aumentan, significaría que el manejo sostenible del agroecosistema ha sido apropiado y la calidad del suelo estaría mejorando.

## **RECOMENDACIONES GENERALES**

Para futuras investigaciones se debe incluir el estudio de la cantidad y calidad de los residuos orgánicos aportados al suelo, tanto por los árboles de sombra como por el cultivo de café en los suelos investigados.

Evaluar los rendimientos en grano de café verde por hectárea para cada variedad cultivada que permita comparar con los resultados obtenidos en los ICS y así poder evaluar rendimientos de los cultivos versus índices de calidad del suelo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aciego, J.C. y Brookes, P.C. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biology Biochemistry*. 40: 1856 – 1861.
- Aguiar, M. 2008. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Tesis. Universidade Federal de Vicosa. Minas Gerais Brasil. p. 91.
- Abera, G. y Wolde-Meskel, E. 2013. Soil Properties, and Soil Organic Carbon Stocks of Tropical Andosol under Different Land Uses. *Open Journal of Soil Science*. 3: 153 – 162.
- Alcântara, M., Silva Junior, M., Melo, V., Costa, S. y Souza, R. 2011. Avaliação da atividade enzimática de solos de sistemas de floresta primária-pastagem de marabá (pa). Anais do 9º Seminário Anual de Iniciação Científica, 19 a 21 de Outubro.
- Alef, K. 1995. Dehydrogenase activity. In: Alef, K. and Nannipieri, P. (eds.) *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London. 228 – 231.
- Alef, K. y Kleiner, D. 1986. Arginine ammonification, a simple method to estimate microbial activity potentials in soils. *Soil Biology & Biochemistry* 18: 233 – 235.
- Alef, K. y Nannipieri, P., 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London
- Alfaro, M. 2004. Matéria orgânica e indicadores biológicos da qualidade do solo na cultura do café sob manejo agroflorestal e orgânico. Tesis doctoral. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Instituto de Agronomia curso de pós-graduação em Agronomia Ciência do Solo.
- Almeida, E., Polizei, R., Gomes, L., Xavier, F. y Mendonca, E. 2007. Biomassa microbiana em sistema agroflorestal na zona da mata minerira. *Revista Brasileira de Agroecologia* 2(2): 739 – 742.
- Alon, A. y Steinberger, Y. 1999. Response of the soil microbial biomass and nematode population to a wetting event in nitrogen-amended Negev desert plots. *Biology and Fertility of Soils*. 30(1-2): 147 – 152.
- Anderson, J. y Domsch, K. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biology Biochemistry*. 10: 215 – 221.
- Anderson, J. e Ingram, J. 1993. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. Second Edition. CAB International. Wallingford, UK. p. 62.
- Anderson, M.J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*. 26: 32 – 46.
- Anderson, M. J. y Ter Braak, C. 2003. Permutation tests for multi-factorial analysis of variance. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 73(2): 85 – 113
- Anderson, M.J. y Willis, T.J. 2003. Canonical analysis of principal coordinates: a useful method of constrained ordination for ecology. *Ecology*. 84(2): 511 – 525.
- Anderson, M.J. 2006. Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics*. 62: 245 – 253.
- Anderson, M.J., Gorley, R.N., Clarke, K.R. 2008. *PERMANOVA + for PRIMER*. Guide to software and statistical methods. Plymouth, U.K. PRIMER-E. 214 p.
- Anderson, T.H. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 98: 285 – 293.
- Anderson, T. y Domsch, K. 1989. Ratios of microbial biomass carbon total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21(4): 471 – 479.
- Anderson, T. H. y Domsch, K. H. 1985a. Maintenance carbon requirements of actively-metabolizing microbial populations under in situ conditions. *Soil Biology & Biochemistry*. 17: 197 – 203.
- Anderson, T. H. y Domsch, K. H. 1985b. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biology and Fertility of Soils*. 1. 81-89.
- Anderson, T. H. y Domsch, K. H. 1986. Carbon link between microbial biomass and soil organic matter. In *Perspectives in Microbial Ecology*, Proceedings of the 4th International Symposium on Microbial Ecology. Ljubljana, Yugoslavia. 467 – 471.
- Anderson, T. H. y Domsch, K. H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO<sub>2</sub>, and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology & Biochemistry* 22: 251 – 255.
- Anderson, T. H. y Domsch, K. H. 1993. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environment conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 25(3): 393 – 395.

- Anderson, T. H. y Gray, T. R. 1991. The influence of soil organic carbon on microbial growth and survival. En *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture & The Environment* (W. S. Wilson, Ed.). Redwood Press, Melksham. 253 – 266.
- Anderson, T. H. y Joergensen, R. G. 1997. Relationship between SIR and FE estimates of microbial biomass C in deciduous forest soils at different pH. *Soil Biology Biochemistry* 29:1033 – 1042.
- Andrews, S.S. 1998. Creating a minimum data set to compare soil quality under poultry litter management alternatives. P. 68 – 109. In *Sustainable agriculture alternatives: Ecological and managerial implications of poultry litter management alternatives applied to agronomic soils*. Ph.D. diss. Univ. of Georgia, Athens.
- Andrews, S. y Carrol, C. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem managemen. *Ecological Applications*, 11(6): 1573 – 1585.
- Andrews, S., Karlen, d. y Mitchell, J. 2002. A comparison of soil cuality indexing methods for vegetable production system in northern California. *Agric. Ecosist. Environ.* 90: 25 – 45.
- Andrews, S., Karlen, D. y Cambardella, C. 2004. The Soil Management Assessment Framework. *Soil science society of America Journal (SSSAJ)*. 68(6): 1945 – 1962.
- Anjaneyulu, E., Balaji, M., Narasimha, G. y Ramgopal, M. 2011. Effect of pig iron slag particles on soil physico-chemical, biological and enzyme activities. *Ira. J. Energy Environ.* 2(2): 161 – 165.
- Aponte, H. 2014. Efecto del tipo de agua de riego sobre las propiedades bioquímicas de suelos bajo pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) en el valle de Quíbor, estado Lara, Venezuela. Trabajo de Grado, para optar al título de Magister Scientiarum, mención Ecología. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Caracas. 163 p.
- Aponte, H., Paolini, J. y Mogollón, J. 2011. Efecto del Cují asociado al cultivo de sábila sobre las propiedades bioquímicas de un suelo del semiárido falconiano. *Agronomía Tropical*. 61: 5 – 13.
- Aquino, A., De-Polli, H. y Ricci, M. 1998. Estudos preliminares sobre a população de minhocas (Oligochaeta) e biomassa microbiana no solo na transição de café sob manejo convencional para orgânico. In: *Reunião Brasileira de fertilidade do solo e nutrição de plantas, 23., Reunião Brasileira sobre micorrizas, 7., Simpósio Brasileiro de Biologia do Solo, Caxambu. Resumos. Lavras: UFLA.* 403p
- Aranguren, J., Escalante, G. y Herrera, R. 1982. Nitrogen cycles of perennial crops under shade trees. I. Coffee. *Plant Soil* 67: 247 – 258.
- Araujo, A., Leite, L., Santos, V. y Carneiro, R. 2009. Soil Microbial Activity in Conventional and Organic Agricultural Systems. *Sustainability*. 1: 268 – 276.
- Arcila, J. 2011. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. 21 – 60. En: Arcila, J. 2011. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Fitotecnia-Cenicafé.
- Arellano, G. 2000. Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*. 44: 79 – 86.
- Arellano, R., Paolini, J., Robles, R. y Villegas, E. 2006. Nitrogen and Phosphorus Contributions from Litterfall in Shade Grown Coffee (*Coffea arábica*) Plantations in the Venezuelan Andes. 18th World Congress of Soil Science July 9-15, 2006 - Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Ascanio, R. 2011. Por el aroma ya no sé. *VenEconomía industria y comercio*. 28 (8).
- Astier-Calderon, M., Maass, M. y Etchevers, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36: 605 – 620.
- Baldrian, P., Snajdr, J., Merhautová, V., Petra Dobiášová, P., Cajthaml, T., Valásková, V. 2013. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change. *Soil Biology & Biochemistry* 56: 60 – 68.
- Balota, E.L. y Chaves, J.C. 2011. Microbial activity in Soil cultivated with different summer legumes in Coffee Crop. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 54(1): 35 – 44.
- Balota, E.L. y Chaves, J.C. 2010. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34 (5): 1573 – 1583.
- Balota, E., Filho, A., Andrade, D. y Dick, R. 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*. 77: 137 – 145.
- Bandick, A. y Dick, R. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1471 – 1479.
- Barros, J., Notaro, K., Medeiros, E., Moreira, K. y Silva, A. 2013. Estimativa da atividade enzimática urease em solos do agreste meridional de Pernambuco. XIII Jornada de ensino, pesquisa e extensão – JEPEX – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro.

- Baruah, M. y Mishra, R. 1984. Dehydrogenase and urease activities in rice-field soils. *Soil biology & Biochemistry* 16: 423 – 424.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C. 2008. Past, Present and Future of soil quality índices: A biological perspective. *Geoderma*, 147: 159 – 171.
- Bastida, F., Moreno, J., Hernández, T., García, C. 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology y Biochemistry*. 38: 3463 – 3473.
- Beer, J., Bonneman, A., Chavez, W., Fassbender, H., Imbach, A. y Martel, I. 1990. Modeling agroforestry systems of cacao with *Cordia alliodora* and *Erythrina poeppigiana* in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. *Agrofor Syst* 12: 229 – 249.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D. y Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139 – 164.
- Benavides, J. y Gutiérrez, G. 1978. Observaciones sobre el comportamiento del cultivar Catuai (*Coffea arabica* L.) en Costa Rica. *Agron. Costarr.* 2(2): 109 – 115.
- Benintende, S., Benintende, M., Sterren, M. y De Battista, J. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological Indicators* 8: 704 – 708.
- Benitez, E., Nogales, R., Campos, M. y Ruano, F. 2006. Biochemical variability of olive-orchard soils under different management systems. *Applied Soil Ecology* 32, 221 – 231.
- Bloem, J., Schouten, A., Sorensen, S., Rutgers, M., Van Der Werf, A., y Breure, A. 2006. Chapter 3. Monitoring and Evaluating Soil Quality. In: *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*. Bloem, J., Hopkins, D., and Benedetti, A. (Eds.) CAB International. 23 – 49.
- Blonska, E. y Januszek, K. 2013. Usability of enzyme activity in estimation of forest soil quality. *Folia Forestalia Polonica, series A*. 55 (1), 18 – 26.
- Boyce, J.K., Fernández, A., Fürst, E. y Segura, O. 1994. *Café y Desarrollo Sostenible: Del Cultivo Agroquímico a la Producción Orgánica en Costa Rica*. EFUNA, Heredia, Costa Rica.
- Brejda, J., Moorman, T., Smith, J., Karlen, D., Allan, D. y Dao, T. 2000. Distribution and Variability of Surface Soil Properties at a Regional Scale. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3): 974 – 982.
- Bremner, J. M. 1996. Nitrogen total. En: *Methods of soil analysis, part 3*. Sparks, D. L., Page, A.L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. M., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. y Sommers, M. E. (eds.) Pp 1085-1121. Chemical methods. ASA-SSSA, Madison, W. I.
- Brookes P.C., Aciego Pietri J.C., Wu Y., Xu J. 2011. Microbial indicators of soil quality in upland soils. In: *Molecular Environmental Soil Sciences at the Interfaces of the Earth's Critical Zone*. Chinese Book Chapter (In Press).
- Burbano, H. 2001. La material orgánica del suelo en el contexto de una agricultura sostenible. S.C.C.S. *Fertilidad de suelos, diagnóstico y control*. Bogotá – Colombia. Segunda edición. 188 – 217.
- Burns, R.G. 1978. Enzyme in soil: some theoretical and practical considerations. In *Soil Enzymes* (Burns, R.G. Ed). Academic Press, London. 295 – 339.
- Burns, R.G. 1982. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14, 423 – 427.
- Camiña, F., Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F. y Leiros, C. 1998. Measurement of dehydrogenase activity in acid soils rich in organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1005 – 1011.
- Canet, R., Albiach, R. y Pomares, F. 2000. Los índices de actividad biológica como herramienta de diagnóstico de la fertilidad del suelo en agricultura ecológica. En: García, C., Hernández, M.T. (Eds), *Investigación y perspectivas de la Enzimología de suelos en España*. CEBAS-CSIC. 11 – 39.
- Cardona, D., Sadeghian, S. 2005. Evaluación de propiedades físicas y Químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*. 56 (4): 348 – 364.
- Cardoso, I. M., Janssen, B. H., Oenema, O. y Kuyper, T. 2003. Phosphorus pools in Oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. *Agroforestry Systems*. 58: 55- 64.
- Carvalho, A. y Monaco, L. 1972. Transferência do fator Caturra para o cultivar mundo novo de *Coffea arabica*. *Bragantia*. 31: 379 – 399.
- Carvalho, F., Souza, F., Nogueira, E. 2012. Chemical and biochemical properties of *Araucaria angustifolia* (Bert.) Ktze. forest soils in the state of São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 36(4): 1189 – 1201.
- Casanova, E. 1991. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Central de Venezuela. Consejo de desarrollo Científico y Humanístico. Caracas. 2ª. Reimpresión. 379p.
- Donahue, R., Miller, R. y Shickluna, J. 1981. *Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas*. Editorial Prentice/Hall Internacional. 624 p.

- Chacón, N., Herrera, I., Flores, S., González, J. y Nassar, J. 2009. Chemical, physical, and biochemical soil properties and plant roots as affected by native and exotic plants in Neotropical arid zones. *Biology and Fertility of Soils*. 45(3): 321 – 328.
- Cheng, W.X., Zhang, Q.L., Coleman, D.D., Carroll, C.R., Hoffmann, C.A. 1996. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere? *Soil Biol. Biochem.* 28: 1283 – 1288.
- Cheng, F., Peng, X., Zhao, P., Yuan, J., Zhong, C., Cheng, Y., Cui, C. y Zhang, S. 2013. Soil Microbial Biomass, Basal Respiration and Enzyme Activity of Main Forest Types in the Qinling Mountains. *PLOS ONE*. 8(6): e67353: 1 – 12.
- Cherubin, M., Karlen, D., Cerri, C., Franco, A., Tormena, C., Davies, A. y Cerri, C. C. 2016. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. *Plos One*. 11(3): e0150860. 1 – 26.
- Contreras, F., Paolini, J. y Rivero, C. 2006. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la actividad de la ureasa en suelos del municipio Rivas Dávila (estado Mérida). *Venezuelos*. 10(1 y 2): 12 – 17.
- Cortes, L. y Malagón, D. 1983. Los levantamientos de suelos y sus aplicaciones multidisciplinarias. Centro interamericano de Desarrollo integral de aguas y tierras. Mérida. 409 p.
- Correa, M., Galvão, J., Fontanetti, A., Miranda, G. y Rodrigues, O. 2010. Avaliação Microbiológica do solo em plantio de milho orgânico e convencional por meio da atividade enzimática. XXVIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo.
- Cuenca G., Aranguren, J. y Herrera, R. 1983. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. *Plant and Soil*. 71: 477 – 486.
- DaMatta, F. Ronchi, C. Maestri, M. y Barros, R. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol* 19(4): 485 – 510.
- D'Andréa, A. F., Silva, M., Curi, N., Siqueira, J. O. y Carneiro, M. 2002. Biological indicator attributes of soil quality under cultivated and natural pasture in the Pantanal wetlands. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 26: 913 – 923.
- Das, P., Pal, R., y Chowdhury, A. 2007. Effect of novaluron on microbial biomass, respiration, and fluorescein diacetate–hydrolyzing activity in tropical soils. *Biology and Fertility of Soils* 44: 387 – 391.
- Del Pozo, J., González, E., Cásares, R., Castillo, A. y Meneses, H. 2011. Altura de colocación de trampas de interceptación y su efecto sobre la captura de *Hypothenemus hampei* (Ferrari). *Entomotropica*. 26(1): 39 – 46.
- Deng, S.P., Tabatabai, M.A. (1996). Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: I. Amidohydrolases. *Biol Fertil Soils*. 22: 202 – 207.
- Deng, S.P., Tabatabai, M.A. 1997. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. *Biol Fertil Soils* 24: 141 – 146.
- Díaz-Raviña, M., Acea, M. y Carballas, T. 1993. Microbial biomass and C and N mineralization in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 20: 817 – 823.
- Dick, R.P., 1994. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal*. 56: 783 – 788.
- Dick, R.P. 1992. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric. Ecosys. Environ.* 40: 25 – 36.
- Dick, R. P. 1997. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: *Biological indicators of soil health*. Pankhursts, C.E., Doube, B. M. y Gupta, V. V. (eds.). 121 – 156. CAB International, Walingford, Inglaterra.
- Dick, R. P. y Burns, R. G. 2011. A brief history of soil enzymology research. In: *Dick RP (ed) Methods of soil enzymology*. Soil Science Society of America, Madison. 1 – 34.
- Dick, W.A. y Tabatabai, M.A. 1993. Significance and potential uses of soil enzymes. En: *Soil Microbial Ecology. Applications in agricultural and environmental management*. Blaine, F. (Ed.) Marcel Dekker, New York. 95 – 127.
- Dick, W.A. y Tabatabai, M.A. 1992. Significance and potential uses of soil enzymes. En: *Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management*. Metting Jr FB (eds.). Marcel Dekker, New York, NY, USA. 95 – 127.
- Dick, W.A. 2011. Development of a soil enzyme reaction assay. In: *Dick RP (ed) Methods in soil enzymology*. Soil Science Society of America, Madison. 57– 69.
- Dilly, O. 2005. Microbial Energetics in Soils. En: *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Varma A y Buscot F (eds.). Springer. Berlin Heidelberg. 123 – 138.

- Dilly, O., Winter, K., Lang, A. y Munch, J. C. 2001. Energetic eco-physiology of the soil microbiota in two landscapes of southern and northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 164(4): 407 – 413.
- Dilly, O. y Munch, J. 1996. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*alnus glutinosa* (L.) gaertn.) forest. *Soil Biol. Biochem.* 28(8): 1073 – 1081.
- Doran, J.W. y Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing Soil Quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds). *Defining Soil Quality for a Special Environment*. Special Publication 35. Am Soc. Agron. Madison, Wisconsin. 3 – 21.
- Doran, J.W., Coleman, D.C. Bezdicek, D.F. y Stewart, B.A. (Eds). 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. 35. Soil Science Society of America, Madison, WI. (608-273-8080).
- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C. y Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1): 37 – 46.
- Egamberdieva, D., Renella, G., Wirth, S. e Islam, R. 2011. Enzyme Activities in the Rhizosphere of Plants. En: Shukla, G. and A. Varma (eds.), *Soil Enzymology, Soil Biology*. 22: 149 – 166.
- Eivazi, F. y Tabatabai, M.A. 1988. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 20: 601 – 606.
- Ekenler, M. y Tabatabai, M.A. 2003. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. *Biol Fertil Soils* 39: 51 – 61.
- Elabed, N., Grissa, H., Mousrati, N. y Kheder, M. 2014. Effect of different organic crop rotations on soil chemical and biochemical properties. *Annals of Biological Research*. 5(5): 4 – 10.
- Espinosa, J. 2001. Acidez y encalado de los suelos. En: *Fertilidad de suelos diagnóstico y control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 2 Ed. 113 – 128.
- Evangelista, C., Partelli, F., Ferreira, E. y Correchel, V. 2012. Atividade enzimática do solo sob sistema de produção orgânica e convencional na cultura da cana-de-açúcar em Goiás. *Ciências Agrárias, Londrina*. 33(4): 1251 – 1262.
- Falcão, I., Lacerda, M., Mendes, I., Leão, T. y Carmo, F. 2013. Qualidade do solo cultivado com morangueiro sob manejo convencional e orgânico. *Pesq. Agropec. Trop., Goiânia*, 43(4): 450 – 459.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2003. *Biological management of soil ecosystems for sustainable agricultura*. Report. International Technical Workshop organized by EMBRAPA-Soybean and Food and FAO. Londrina, BR. 24-27 June 2002. *World Soil Resources Reports* 101. Rome, IT. 102 p.
- Fassbender, H. W. 1987. Nutrient cycling in agroforestry systems of coffee (*Coffea arábica*) with shade trees in the Central Experiment of CATIE. In: Beer, J., Fassbender, H. and Heuvelop, J. (eds) *Advances in Agroforestry Research*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 155 – 165.
- Finkenbein, P., Kretschmer, K., Kuka, K., Klotz, S., Heilmeyer, H. 2013. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump. *Soil Biology & Biochemistry*. 56: 87 – 89.
- Fließbach, A., Martens, R. y Reber, H. 1994. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biol Biochem* 26: 1201 – 1205.
- Fließbach, A. y Mäder, P. 2000. Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 757 – 768.
- FONAIAP. 1990. *Manual de Métodos y Procedimientos de Referencia. Análisis de Suelo para Diagnóstico de Fertilidad*. Serie D N° 26. Escuela de Agronomía. UCLA. Maracay. Ministerio de Agricultura y Cría. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. CENIAP (Centro de Investigaciones Agropecuarias).
- García, A. 2001. Conceptos sobre el uso del análisis de suelos como herramienta para el diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: *Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Palmira. 213 p.
- García, C., Gil-Sotres, F., Hernández, T. y Trasar-Cepeda, M. 2003. *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en suelos. Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana*. Editorial Mundi-Prensa. España
- García, C. y Hernandez, T. 2000. *Investigación y perspectivas de la enzimología de suelos en España*. CEBAS-CSIC, Murcia. 352 p.
- García, C., Hernández, T., Costa, F., Ceccanti, B. y Ganni, A. 1993. Hidrolases in the organic matter fractions of sewage sludge: changes with composting. *Bioresource Technology*. 45: 47 – 52.

- García-Ruiz, R., Ochoa, V., Hinojosa, M., Carreira, J. 2008. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 40: 2137 – 2145.
- Gianfreda, L. y Ruggiero, P. 2006. Enzyme activities in soil. In: Nannipieri P, Smalla K (eds) *Nucleic acids and proteins in soil*, vol 8. Springer, Berlin. 257 – 311.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, M., Ciardi, C. y Ceccanti, B. 1992. Biochemical characterization of biological activity in very young mine soils. *Biol. Fertil. Soils* 13: 25 – 30.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, M., Leirós, M., Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology & Biochemistry*. 37: 877 – 887.
- Gilabert de Brito, J., Arrieché Luna, I.E., León Rodríguez, M., López de Rojas, I (comp.). 2015. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. Maracay, VE, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 215 p.
- Glaeser, D., Mercante, F., Alves, M., da Silva, R. y Komori, O. 2010. Biomassa microbiana do solo sob sistemas de manejo orgânico em cultivos de café. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde* 14(2): 103 – 114.
- Glover, J., Reganold, J. y Andrews, P. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 80: 29 – 45.
- Gómez, Y. y Paolini, J. 2006. Actividad microbiana en suelos de sabanas de los Llanos Orientales de Venezuela convertidas en pasturas. *Rev. Biol. Trop.* 54(2): 273 – 285.
- Gómez, Y. y Paolini, J. 2008. Efecto de la variabilidad temporal y el manejo del suelo sobre los parámetros microbiológicos en sabanas de los llanos orientales de Venezuela. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*. 20(1): 18 – 28.
- González-Prieto y Caballas, 1995. N Biochemical diversity as a factor of soil diversity. *Soil Biol. Biochem.* 27(2): 205 – 210.
- González, L. y Gudiño, C. 2007. Mineralización del Carbono en suelos cafetaleros de la microcuenca del río Monaquito, municipio Pampán, estado Trujillo: Trabajo especial de grado (Ingeniero Agrícola) Universidad de Los Andes, núcleo Rafael Rangel, Trujillo. 99 p.
- Görres, J.H., Dichiarot, M., Lyons, J. y Amador, J. 1998. Spatial and temporal patterns of soil biological activity in a forest and an old field. *Soil Biology and Biochemistry*. 30: 219 – 230.
- Griffiths, B., Ritz, K., Wheatley, R., Kuan, H., Boag, B., Christensen, S. et al. 2001. An examination of the biodiversity–ecosystem function relationship in arable soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*. 33: 1713 – 1722.
- Hair, Jr., Babin, B., Money, A. y Samouel, P. 2005. Fundamentos de métodos de pesquisa em administração. Porto Alegre. Bookman. 471 p.
- Hedo, J., Lucas-Borja, M., Wic-Baena, C., Andrés-Abellán, M. y Heras, J. 2015a. Experimental site and season over-control the effect of *Pinus halepensis* in microbiological properties of soils under semiarid and dry conditions. *Journal of Arid Environments*. 116: 44 – 52.
- Hedo, J., Lucas-Borja, M., Wic-Baena, C., Andrés-Abellán, M. y Heras, J. 2015b. Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands. *Solid Earth*. 6: 243 – 252.
- Henao-Jaramillo, J. 1996. El café en Venezuela. 2da. Edición, Universidad Central de Venezuela. Ediciones Biblioteca, Caracas, Venezuela. 280 p.
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., Nogales, R. 2014. Actividad enzimática del suelo -deshidrogenasa, -glucosidasa, Fosfatasa y ureasa - bajo diferentes cultivos. *Agronomía Costarricense*. 38(1): 43 – 54.
- Hernández, W., Rojas-Ordaz, J., Rivero, C., Centeno, A. y Paolini, J. 2003. Efecto de tres sistemas de labranza sobre la actividad de la deshidrogenasa de un suelo cultivado con maíz (*Zea mays* L.). *Revista Facultad de Agronomía (Maracay)* 29: 171 – 181.
- Hernández, I. y Platen, H. 1995. Maderables como alternativa para la substitución de sombras en cacaotales establecidos: la economía. Serie Técnica Informe Técnico No. 259. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. VI Edición. Bogotá, Subdirección de Agrología. 449p.
- Imbach, A., Fassbender, H., Beer, J., Borel, R. y Bonneman, A. 1989a. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poro (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. IV. Balances hídricos y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba* 39: 400 – 414.

- Imbach, A., Fassbender, H., Beer, J., Borel, R. y Bonneman, A. 1989b. Modeling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and *Erythrina poeppigiana* in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs, and leaching. *Agrofor Syst* 8: 267 – 287.
- Insam, H. y Domsch, K. H. 1988. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology IS*, 177 – 188.
- Insam, H. y Haselwandter, K. 1989. Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia*. 79: 174 – 178.
- Islam, K.R. y Weil, R. 2000. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *J. Soil Water Conserv., First Quarter*: 69 – 78.
- Izaguirre-Mayoral, M.L., Flores S. y Carballo, O. 2002. Determination of acid phosphatase and dehydrogenase activities in the rhizosphere of nodulated legume species native to two contrasting savannas in Venezuela. *Biology Fertility of Soils* 35: 470-472.
- Jackson, M. L. 1962. *Soil Chemical Analysis*. Constable and Company, Ltd. London.
- Jenkinson, D. y Ladd, J. 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. En: *Soil Biochemistry*. E.A. Paul y J.N. Ladd (eds.), Marcel Dekker, New York. 5: 415 – 472.
- Joergensen, R. G. 2010. Organic Matter and Micro-Organisms in Tropical Soils. En P. Dion (ed.), *Soil Biology and Agriculture in the Tropics, Soil Biology*. Berlin Heidelberg. 21: 17 – 44.
- Joergensen, R. G., Brookes, P. C. y Jenkinson, D. S. 1990. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperature. *Soil Biology & Biochemistry*. 22: 1129 – 1136.
- Kandeler, E., 1995. Protease activity. In: Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E. & Margesin, R. (Eds.), *Methods in Soil Biology*. Springer, Verlag, Berlin. 210 – 216.
- Kandeler, E. y Gerber, H. 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and Fertility of Soils*. 6: 68 – 72.
- Kandeler, E., Stemmer, M. y Gerzabek, M. 2005. Role of Microorganisms in Carbon Cycling in Soils. En Buscot, F. y Varma, A. (eds) *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. *Soil Biology* 3. Berlin Heidelberg. pp. 139 - 157
- Karaca, A., Cetin, C., Turgay, O. y Kizilkaya, R. 2011. Soil Enzymes as Indication of Soil Quality. In: G. Shukla and A. Varma (eds.), *Soil Enzymology, Soil Biology*. 22.
- Karlen, D., Ditzler, C., Andrews, S.S. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114: 145 – 156.
- Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J., Cline, R., Harris, R., Schuman G. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society American Journal* 61: 4 – 10.
- Karlen, D. y Stott, D. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, D., Coleman, D., Bezdicek, D. y Stewart, B. (Editors), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publ. 34. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI.
- Kheyrodin, H., Ghazvinian, K. y Taherian, M. 2012. Tillage and manure effect on soil microbial biomass and respiration, and on enzyme activities. *African Journal of Biotechnology*. 11(81): 14652 – 14659.
- Klose S. 2003. Enzyme mediated reactions and microbial biomass in agricultural and fly ash influenced forest ecosystems. Habilitation dissertation Dresden University of Technology, Dresden, Germany.
- Klose, S. y Tabatabai, M.A. 1999. Urease activity of microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*. 31: 205 – 211.
- Kuit, M. Jansen, D. Thiet, N. 2004. Manual for Arábica cultivation. Tan Lam agricultural product joint stock company & PPP project improvement of coffee quality and sustainability of coffee production in Vietnam. 219p.
- Kujur, M., Kumar, S., Kumar, A. 2012. Quantifying the contribution of different soil properties on enzyme activities in dry tropical ecosystems. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*. 7(9): 763 – 772.
- Kursten, E. y Burschel, P. 1993. CO<sub>2</sub> mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution*. 70: 533 – 544.
- Lammel, D.R., Azevedo, L.C.B., Paula, A.M., Armas, R.D., Baretta, D. y Cardoso, E.J.B.N. 2015. Microbiological and faunal soil attributes of coffee cultivation under different management systems in Brazil. *Braz. J. Biol.* 75(4): 894 – 905.
- Leão, T., Silva, A., Macedo, A., Imhoff, S. y Euclides, V. 2004. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28: 415 – 423.
- León, J. A. 2007. Estrategias de vida en familias cafetaleras y su relación con la riqueza etnobotánica de fincas en el departamento de Caldas, Colombia. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 140p.

- Letey, J., Sojka, D., Upchurch, D., Cassel, D., Olson, K., Payne, W., Petrie, S., Price, G., Reginato, R., Scott, H., Smethurst, P. y Triplett, G. 2003. Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of soil and water conservation*. 58(4):180 – 187.
- Liebig, M.A., Varvel, G., Doran, J.W., 2001. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*. 93: 313 – 318.
- Lin, Q. y Brookes, P. 1999. Arginine ammonification a method to estimate soil microbial biomass and microbial community structure. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1985 – 1997.
- Longo, R. y Melo, W. 2005. Atividade da urease em latossolos sob influência da cobertura vegetal e da época de amostragem. *R. Bras. Ci. Solo*. 29: 645 – 650.
- López, R. 2006. Caracterización de tres variedades de café (*Coffea arabica*) en tres zonas ecológicas del país. Tesis. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. 68p.
- Lotter, D. W. 2003. Organic Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*. 21: 59 – 128.
- Lyngbaek, A., Muschler, R. y Sinclair, F. 2001. Productivity and profitability of multi-strata organic versus conventional coffee farms in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 53: 205 – 213.
- Madejón, E., Moreno, F., Murillo, J. y Pelegrín, F. 2007. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*. 94: 346 – 352.
- Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo. Editora Agronômica Ceres Ltda.
- Maluche-Baretta, C., Klauber, O., Amarante, C., Ribeiro, G., y Almeida, D. 2007. Microbiological and chemical soil attributes in apple orchards under conventional and organic production systems in the State of Santa Catarina, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 31: 655 – 665.
- Marchiori Junior, M. y Melo, W. 2000. Alterações na matéria orgânica e biomassa microbiana em solo de marta natural submetido a diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira (Brasília)*. 35(6): 1177 – 1182.
- Martens, D., Johanson, J. y Frankenberger, W. 1992. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. *Soil Sci.* 153: 53 – 61.
- Martinez, J. 2013. Manual Técnico para el manejo de la fertilización en suelos cafetaleros. Proyecto de investigación patrocinado por PAST DANIDA a través de FAITAN FUNICA. 32P.
- Masto, R., Chonkar, P., Singh, D. y Patra, A. 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems y Environment*. 118(1–4): 130 – 142.
- Masto, R., Chonkar, P., Singh, D. y Patra, A. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring Assessment*. 136: 419 – 435.
- Matsuoka, M., Mendes, I. y Loureasauro, M. 2002. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos de Cerrado e sistemas agrícolas anuais e perennes na região de Primavera do Leste/MT. *Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa Agropecuária e Desenvolvimento*, 34: 1 – 25.
- Melero, S., Porras, J.C.R., Herencia, J.F. y Madejón, E. 2006. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil y Tillage Research*. 90(1-2): 162 – 170.
- Melo, E.N., Bombonato, A.K., Moreira, L.M., Faleiro, D.S., Ferreira, M.E. y Caramori, S.S. 2013. Avaliação sazonal da atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase em solos do Cerrado. 53º Congresso Brasileiro de Química. Rio de Janeiro.
- Mendonça, E.S., Leite, C.L., Neto, F.P. 2001. Cultivo do café em sistema agroflorestal: uma opção para recuperação de solos degradados. *R. Árvore, Viçosa – MG*. 25(3): 375 – 383.
- Menéndez, J. y Sabal, J. 2009. Café venezolano: pasando un trago amargo. Ed. IESA, 029.
- Mijangos, I., Pérez, R., Albizu, I., Garbisu, C. 2006. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme Microb. Technol.* 40: 100 – 106.
- Moeskops, B., Sukristiyonubowo., Buchan, D., Sleutel, S., Herawaty, L., Husen, E., Saraswati, R., Setyorini, D. y Neve, S. 2010. Soil microbial communities and activities under intensive organic and conventional vegetable farming in West Java, Indonesia. *Applied Soil Ecology*. 45: 112 – 120.
- Mogollón, J. y Tremont, O. 2002. Efecto del cambio de uso de la tierra sobre la actividad enzimática en agroecosistemas cafetaleros del estado Falcón. *Croizatia*. 3: 16 – 25.
- Moguel, P. y Toledo, V. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*. 13: 11 – 21.
- Mondelli, D., Aly, A., Dagnachew, A., Piscitelli, L., Dumontet, S. y Miano, T. 2014. Short-term effects of different organic amendments on soil chemical, biochemical and biological indicators. *Geophysical Research Abstracts*. 16: EGU2014-14002-1.

- Mora, A. 2011. Characterization of the spatial variability of soil properties and Coffee fine roots in shade tree-coffee associations under organic and conventional management practices. Tropical agriculture research and higher education centre (CATIE), Turrialba, Costa Rica. 130p.
- Moreno, J., Bastida, F., Hernández, T. y García, C. 2008. Relationship between the Agricultural Management of a Semi-arid Soil and Microbiological Quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39(3-4): 421 – 439.
- Mukherjee, A. y Lal, R. 2014. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. *Ploss one*. 9(8): 1 – 15.
- Muñoz-Sánchez, A., Domínguez-Domínguez, E. y Hernández-Sotomayor, Teresa. 2015. Characterizing the relationship between aluminum content and pH in coffee (*Coffea arabica* L.) crop soils in Mexico. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 8(1): 39 – 46.
- Murillo, Y. 2007. Evaluación de la actividad microbiana en un suelo cafetalero enmendado con residuos orgánicos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta. p. 93.
- Murphy, J. y Riley, J. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chimica Acta*. 27: 31 – 36.
- Muschler, R. Yépez, C. Rodríguez, A. Camacho, Grether, W. and Jürgen, H. 2006. Manejo y valoración de la biodiversidad de flora y fauna en cafetales. En Jürgen, H. Soto, L. and Barrera, J. (Ed.). *El Cafetal del futuro*. Ed. Shaker Verlag.
- Muschler, R.G. 1997. Shade or sun for ecologically sustainable coffee production: A summary of environmental key factors. In: III. Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE). Turrialba Costa Rica. 109 – 112.
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M., Landi, L., Pietramellara, G. y Renella, G. 2003. Microbial diversity and soil functions. *Eur J Soil Sci*. 54: 655 – 670.
- Nannipieri, P., Grego, S. y Ceccanti, B. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. In: Bollag J-M, Stozky G (eds) *Soil biochemistry*, 6. Marcel Dekker, New York. 293 – 355.
- Nannipieri, P., Kandeler, E. y Ruggiero, P. 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns RG, Dick R (eds) *Enzymes in the environment*. Marcel Dekker, New York. 1 – 33.
- Nannipieri, P., Landi, L., Giagnoni, L. y Renella, G. 2012. Past, Present and Future in Soil Enzymology, in *Soil Enzymology in the Recycling of Organic Wastes and Environmental Restoration*. Springer. 1 – 17.
- Nannipieri, P., Sequi, P., Fusi, P. 1996. Humus and enzyme activity. In: Piccolo, A. (ed) *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Elsevier, Amsterdam. 293 – 328.
- Narváez, H., Bustamante, I. y Combatt, E. 2014. Estimación de la salinidad en suelos del delta del río Sinú en Colombia, mediante modelos de regresión lineal múltiple. *IDESIA (Chile)*. 33 (3): 81 – 90.
- Ndakidemi, P.A. 2006. Manipulating legume/cereal mixtures to optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems. *African Journal of Biotechnology* 5(25): 25-2533.
- Norcliff, S. 2002. Standarization of soil quality attributes. *Agric., Ecosyst. Environ*. 88: 161 – 168.
- Notaro, K. A., Medeiros, E. V., Duda, G. P. Silva, A. O. y Moura, P. M. 2014. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. *Sci. Agric*. 71(2): 87 – 95.
- Nunes, L., Dias, L., Jucksch, I., Barros, N., Kasuya, M., Correia, M. 2009. Impacto do monocultivo de café sobre os indicadores biológicos do solo na zona da mata mineira. *Ciência Rural*, Santa Maria. 39(9): 2467 – 2474.
- Nunes, L., Filho, J. y Meneses, R. 2006. Impacto da queimada e do pousio sobre a qualidade de um solo sob caatinga no semiárido nordestino. *Revista Caatinga*. 9: 200 – 208.
- Obando, F., Tobasura, I., y Miranda, J. 2011. Evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores locales en sistemas con predominio de café y ganadería en zonas de ladera en Colombia. En: Manejo agroecológico como ruta para lograr la sostenibilidad de fincas con café y ganadería. Serie técnica. Informe técnico No. 387. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Oberson, A., Nanzer, S., Bosshard, C., Dubois, D., Mader, P., y Frossard, E. 2007. Symbiotic N<sub>2</sub> fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by <sup>15</sup>N dilution and <sup>15</sup>N natural abundance. *Plant and Soil*. 290: 69 – 83.
- Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez-Muñoz, B., García-Ruiz, R. 2007. Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Revista electrónica Universidad de Jaen. Ini. Inv.* 2: r1.
- Odum, E. P. 1985. Trends expected in stressed ecosystems. *BioScience*. 419 – 422.

- Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*. 164: 262 – 270.
- Oestreich-Janzen S. (2013) Chemistry of Coffee. In: Reedijk, J. (Ed.) Elsevier Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Waltham, MA: Elsevier. Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J., Lawson, G. y Vaast, P. 2010. Coffee agroforestry systems in Central America: I. A review of quantitative information on physiological and ecological processes. *Agroforest Syst.* 80: 341 – 359.
- OIRSA. 2000. Manual técnico. Buenas prácticas de cultivo en café orgánico. 50 p.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. y Dean, L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. department of Agriculture (USDA). Circular 939.
- Olander, L. y Vitousek, P. 2000. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochemistry*. 49: 175 – 190.
- Orten, J. y Neuhaus, O. 1970. *Biochemistry*. 8th Edition. Mosby, St. Louis. 243 – 244.
- Pabst, H., Kühnel, A. y Kuzyakov, Y. 2013. Effect of land-use and elevation on microbial biomass and water extractable carbon in soils of Mt. Kilimanjaro ecosystems. *Applied Soil Ecology*. 67: 10 – 19.
- Pajares, S., Gallardo, J., Masciandaro, G., Ceccanti, B. y Etchevers, J. 2011. Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated Acrisols in the Mexican trans-volcanic belt. *Land Degrad. Develop.* 22: 373 – 381.
- Paolini, J. 2011. Actividades enzimáticas en suelos de los altos llanos centrales (estado Guárico). *Venezuelas* 11(1-2): 39 – 46.
- Paolini, J. y Acea, M. 2006. Actividades enzimáticas en suelos de un sistema agrícola con descansos largos en los páramos venezolanos. Coloquio internacional: contribución de los Humboldtianos a la investigación y el desarrollo de los países andinos: hacia una red interdisciplinaria. Lima, 8 – 10 de marzo.
- Paolini, J., Aponte, H. y Pierina, A. 2010. Propiedades bioquímicas de suelos del semiárido venezolano. 16th Congress of the international soil conservation organization (ISCO Chile 2010).
- Paolini, J. y Arellano, G. 2004. Actividades enzimáticas en suelos cafetaleros venezolanos. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Cartagena de Indias. Colombia. 26 sept. - 1 de Oct.
- Paolini, J., Arellano, R., Gonzalez, L. y Gudiño, C. 2008. Mineralización del carbono en suelos cafetaleros del estado Trujillo (Venezuela). *Las Fronteras de la Física y Química Ambiental en Ibero América*. 174 – 180.
- Paolini, J., Benzo, D. y Arellano, R. 2013. Índices de calidad del suelo en sistemas cafetaleros andinos. XX Congreso venezolano de la ciencia del suelo. San Juan de los Morros, 25 al 29 de noviembre.
- Paolini, J., Benzo, D. y Arellano, R. 2014. Índices de calidad en sistemas cafetaleros de Venezuela. VII Congreso iberoamericano de física y química ambiental. Viña del Mar (Chile). 6 – 9 de octubre.
- Paolini, J. y Murillo, Y. 2008. Mineralización del carbono en suelos cafetaleros enmendados con residuos orgánicos. XXI Congreso Argentino de la ciencia del suelo.
- Paolini, J., San Blas, E. y Ramos, H. 2006. Actividad de la enzima proteasa en suelos cafetaleros del sector Vitú (estado Trujillo, Venezuela). *Medio Ambiente en Iberoamerica*. Tomo II. Badajoz, España. 350 – 357.
- Partelli, F., Vieira, H., Carvalho, V. y Filho, F. 2007. Diagnosis and Recommendation Integrated System Norms, Sufficiency Range, and Nutritional Evaluation of Arabian Coffee in Two Sampling Periods, *Journal of Plant Nutrition*, 30(10): 1651 – 1667.
- Partelli, F. 2008. Aspectos microbiológicos, nutricionais, fisiológicos e bioquímicos em cafeeiro. Tesis. Universidade Estadual do norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF. Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias como parte das Exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal. Campos dos Goytacazes – RJ. Brasil. 245 p.
- Partelli, F., Vieira, H., De Brito, E., Viana, A., Martins, M., y Urquiaga, S. 2012. Chemical and Microbiological Soil Characteristics under Conventional and Organic Coffee Production Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43: 847 – 864.
- Pérez, A. 2002. Impactos de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo. Tesis. Universidade Federal de Vicosa. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Magister Scientiae. Minas Gerais. Brasil. 93 p.
- Perucci, P., Dumontet, S., Bufo, S., Mazzatura, A., y Casucci, C. 2000. Effects of organic amendment and herbicide treatment on soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*. 32: 17 – 23.
- Pimentel, M. S. 2001. Atributos microbianos e edáficos em produção orgânica de olerícolas comparado com pasto e fragmento de mata secundária. 142 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

- Pimentel, M., Aquino, A., Correia, M., Costa, J., Ricci, M. y De-Polli, H. 2006. Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do médio paraíba fluminense-rj. *Coffee Science, Lavras*. 1(2): 85 – 93.
- Pirt, S. J. 1975. *Principles of Microbe and Cell Cultivation*. Blackwell. Oxford.
- Pohl, W., Mentler, A., Okalany, E., Probst, L. y Zechmeister-Boltenstern, S. 2014. Ecosystem services in smallholder coffee farming systems: a case study in Uganda using chemical soil indicators. Rahmann, G. y Aksoy, U. (Eds.) *Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference. 'Building Organic Bridges'*, at the Organic World Congress. 2014, 13-15 Oct., Istanbul, Turkey (eprint ID 23767).
- Pohlan, H. y Janssens, M. 2010. Growth and production of coffee. In: *Soils, Plant Growth and Crop Production*. Vol.III; Ed. Verheye, W. Eolss Publishers Company Limited.
- 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. CATIE. Tesis. Magister Scientiae en Agricultura Ecológica. Turrialba, Costa Rica.
- Powlson, D.S., Brookes, P.C. y Chistensen, B.T. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides and early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*. 19: 159 – 164.
- Puglisi, E., Del Re, A., Rao, M. y Gianfreda, L. 2006. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology & Biochemistry*. 38: 1673 – 1681.
- Puglisi, E., Nicelli, M., Capri, E., Trevisan, M., y Del Re, A. 2005. A soil alteration index based on phospholipid fatty acids. *Chemosphere*, 61(11): 1548 – 57.
- Quilchano, C. y Marañón, T. 2002. Dehydrogenase activity in Mediterranean forest soil. *Biology and Fertility Soils*. 35: 102 – 107.
- Quinn, G. P. y Keough, M. J. 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, Cambridge. 553 p.
- Reganold, J., Palmer, A., Lockhart, J. y Mac Gregor, A. 1993. Soil quality and financial performance of bio-dynamic and conventional farms in New Zealand. *Science*. 260: 344 – 349.
- Rioja, M. A. (2002). *Apuntes de Fitotecnia General*, E.U.I.T.A., Ciudad Real. 54 p.
- Rossel, D., Tarradelas, J., Bitton, G. y Morel, J. 1996. Use of enzymes in soil ecotoxicology; a case for dehydrogenase and hydrolytic enzymes. En: *Soil ecotoxicology*, (J. Tarradelas, G. Bitton & D. Rossel, eds.). CRC Lewis Publishers, Boca Raton. 179 – 206.
- Ruíz, M. 2001. Características del material orgánico y la actividad biológica de suelos de la depresión del Lago de Valencia sometidos a diversas formas de manejo. Tesis Doctoral. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía.
- Sadeghian, S. 2012. Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. *Suelos Ecuatoriales* 41(1): 46 – 64.
- Sadeghian, S. y González, H. 2012. Alternativas generales de fertilización para cafetales en etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé No. 424*. Gerencia Técnica. Programa de Investigación Científica. Fondo Nacional del Café. Manizales – Colombia. 8 p.
- Salam, A., Afandi., Sriyani, N. y Kimura, M. 2001. Soil enzymatic activities in a hilly coffee plantation in lampung province, South Sumatra, Indonesia, under plant cover management. *Soil Sci Plant Nutr*. 45(4): 695 – 702.
- Sardans, J. y Peñuelas, J. 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. *Soil Biology & Biochemistry*. 37: 455 – 461.
- Sardans, J., Peñuelas, J. y Ogaya, R. 2008. Experiment drought reduced acid and alkaline phosphatase activity and increased organic extractable P in soil in a *Quercus ilex* Mediterranean forest. *European journal of soil biology*. 44: 509 – 520.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E. y Margesin, R. 1995. *Methods in soil biology*. Springer Verlag, New York. 64 – 68.
- Schnürer, J. y Roswall, T. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *App. Environ. Microbiol*. 43: 339 – 344.
- Schoenholtz, S., Van Miegroet, H., Burger, J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. 138: 335 – 356.
- Schlöter, M., Dilly, O. y Munch, J. 2003. Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 98: 255 – 262.

- Staddon, W.J., Duchesne, L.C. y Trevors, J.T. 1998. Acid phosphatase, alkaline phosphatase and arylsulfatase activities in soil from a jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) ecosystem after clear-cutting, prescribed burning and scarification. *Biology Fertility of Soils* 27: 1-4.
- Severino, L. y Oliveira, T. 1999. Sistema de cultivo sombreado do cafeiro (*Coffea arabica* L.) na regio de Baturité, Ceará. *Revista Ceres*. 46(268): 635 – 652.
- Seybold, C., Herrick, J. y Brejda, J. 1999. Soil resilience: A fundamental of soil quality. *Soil Science*. 164(4): 224 – 234.
- Sharma, K., Mandal, U., Srinivas, K., Vittal, K., Mandal, B., Grace, J. y Ramesh, V. 2005. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*. 83(2): 246 – 259.
- Sharma, K., Grace, J., Mandal, U., Gajbhiye, P., Srinivas, K., Korwar, G., Yadav, S. 2008. Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indices in a semi-arid tropical Alfisol. *Soil Research*. 46(4): 368 – 377.
- Sharma, K., Grace, J., Srinivasa, K., Venkateswarlu, B., Korwar, G., Maruthi Sankar, G., Uttam Kumar Mandal, Ramesh, V., Hima Bindu, V., Madhavi, M. y Gajbhiye, P. 2009. Influence of Tillage and Nutrient Sources on Yield Sustainability and Soil Quality under Sorghum–Mung Bean System in Rainfed Semi-arid Tropics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 40(15-16): 2579 – 2602.
- Shaxson, T. F. y Barber, R. 2003. Optimizing soil moisture for plant production. *Soils Bulletin* 79. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Rome, IT.
- Silva, L. 2008. Uso e monitoramento de indicadores microbiológicos para avaliação da qualidade dos solos de Cerrado sob diferentes agroecossistemas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. 117 p.
- Silveira, O. A. 2007. Atividades enzimáticas como indicadores biológicos de solos agrícolas do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Sims, J.R., Haby, V.A. 1971. Simplified colorimetric determination of carbon soil organic matter. *Soil Sci*. 112: 137 – 141.
- Skujins, J. 1967. Enzymes in soil. En: *Soil Biochemistry*. McLaren, A. y Peterson, G. H. (eds.). Marc Dekker Publishers, New York. 371 – 414.
- Souza, R.V., Júnior, M. L., Alcantara, M. M., Sobrinho, R. J. y Costa, S. D. 2012. Atividade enzimática do solo utilizando queima e trituração no preparo de área no nordeste paraense. *Anais do 10º Seminário Anual de Iniciação Científica da UFRA*
- Sparling, G. P. 1992. Ratio between microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust J Soil Res* 30: 195 – 207.
- Spiers, G. y McGill, W. 1979. Effects of phosphorus addition and energy supply on acid phosphatase activity in soils. *Soil Biol, Biochem*. 11: 3 – 8.
- Stepniewska, Z., Wolinska, A. y Lipinska, R. 2007. Effect of Fonofos on Soil Dehydrogenase Activity. *International Agrophysics*. 21: 101 – 105.
- Stozky, G. 1965. Microbial respiration. In: *Methods of soil analysis*. Part. 2 Chemical and microbiological properties. Black, C.A. (editor). Monograph Agronomy 9. American Society of Agronomy, Inc., Madison, pp. 1550 – 1572.
- Stott, D., Andrews, S., Liebig, M., Wienhold, B. y Karlen, D. 2010. Evaluation of  $\beta$ -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal* 74(1): 107 – 119.
- Suárez, M. 2005. Estudio Bioquímico de suelos del Municipio Andrés Bello Blanco (cuenca alta del rio Yacambú), Estado Lara. Trabajo Especial de Grado (Magister Scientiarum en Ciencia del Suelo). Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay. 125 p.
- Swift, M. J. y Wommer, P. 1993. Organic matter and the sustainability of agricultural systems: definition and measurement. In: Mulongoy K, Merckx R (eds) *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. Wiley-Sayce Co-Publication, IITA/KU Leuven. 3 – 18.
- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. In: Weaver RW, Angle S, Bottomley P, Bezdicek D, Smith S, Tabatabai A, Wollum E (eds) *Methods in soil analysis*. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America, Madison. 775 – 833.
- Tabatabai, M. A. y Bremner, J. M. 1969. Use of p-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology Biochemistry*. 1: 301 – 307.

- Taylor J. P., Wilson B., Mills M. S. y Burns R.G. 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biol. Biochem.* 34: 387 – 401.
- Theodoro, V., Alvarenga, M., Guimarães, R. y Mourão Júnior, M. 2003. Carbono da biomassa microbiana e micorriza em solo sob mata nativa e agroecossistemas cafeeiros. *Acta Scientiarum. Agronomy (Maringá).* 25(1): 147 – 153.
- Tiedje, J., Cho, J., Murray, A., Treves, D., Xia, B. y Zhou, J. 2001. Soil teeming with life: new frontiers for soil science. In: *Sustainable Management of Soil Organic Matter* (eds R.M. Rees, B.C. Ball, C.D. Campbell & C.A. Watson). CAB International, Wallingford, pp. 393 – 412.
- Torres, S., Madero, L., y Perdomo, C. 2009. Perfiles de suelos que integran la colección del centro de información y referencia de suelos (CIRS). (Características y propiedades más relevantes). Centro de Información y Referencia de Suelos (CIRS), Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía UCV. Maracay. 217 p.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, C., Gil-Sotres, F. y Seoane, S. 1998. Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils.* 26(2): 100 – 106.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. y Gil-Sotres, F. 2000. Biochemical properties of acid soils under oak vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters. *Soil Biology & Biochemistry.* 32: 747 – 755.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. y Gil-Sotres. 2008a. Modification of biochemical properties by soil use. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8(2): 53 – 60.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, M., Seoane, S., Gil-Sotres, F. 2008b. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Applied Soil Ecology.* 39: 133 – 143.
- Trejos, S. y Platen, H. 1995. Sombras maderables para cacaoales: aspectos económicos. Serie Técnica Informe Técnico No. 266. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Tripathy, S., Bhattacharyya, P., Mohapatra, R., Som, A. y Chowdhury, D. 2014. Influence of different fractions of heavy metals on microbial ecophysiological indicators and enzyme activities in century old municipal solid waste amended soil. *Ecological Engineering.* 70(0): 25 – 34.
- Tully, K. y Lawrence, D. 2011. Closing the Loop: Nutrient balances in organic and conventional coffee agroforests. *Journal of Sustainable Agriculture.* 35(6): 671 – 695.
- Uzcategui, X. 2009. Propiedades bioquímicas en los suelos cafetaleros de los Altos Mirandinos en diferentes épocas climáticas (Lluvia y seca). Tesis MSc. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Caracas. 98 p.
- Wander, M. y Bollero, G. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal.* 63: 961 – 971.
- Wright, A.L. y Reddy, K.R. 2001. Phosphorus loading effects on extracellular enzyme activity in Everglades wetland soils. *Soil Science Society American Journal* 65: 588-595.
- Zhang, C., Xue, S., Liu, G., Song, Z. 2011. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China. *Plant Soil.* 347:163 – 178.
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Mataix-Beneyto, J., Morugán, A. 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment.* 378: 233 – 237.
- Zornoza, R., Acosta, J., Bastida, F., Domínguez, S., Toledo, D. y Faz, A. 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *Soil.* (1): 173 – 185.
- Zuluaga, J. 2004. Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook en Costa Rica. Tesis MSc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 116 p.  
<http://newsgroups.derkeiler.com/pdf/Archive/Soc/soc.culture.venezuela/2011-12/msg02965.pdf>.  
[http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/CVCS19/uso\\_manejo\\_suelo/UMS30.pdf](http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/CVCS19/uso_manejo_suelo/UMS30.pdf). (Quiroz, A., Arrieche, I., Jiménez, M. Efecto de la fertilización orgánica en un suelo cafetalero de Sanare. Estado Lara)

## ANEXOS

### ANEXO 1.

Tabla 1. Prueba de normalidad del error de Kolgomorov-Smirnov ( $p \leq 0,05$ ) para las variables de las propiedades físicas, químicas, y bioquímicas y microbiológicas.

Variable	Estadístico	P-Valor
<b><i>Propiedades físicoquímicas</i></b>		
%Humedad	0,0756	$>0,1500$
DA	0,0783	$>0,1500$
%Arcilla	0,0884	$>0,1500$
%Limo	0,0919	$0,1348$
%Arena	0,0623	$>0,1500$
pH	0,0868	$>0,1500$
CE	0,0610	$>0,1500$
CIC R	0,1365	$<0,0100$
Ca	0,1136	$0,0213$
Mg	0,0833	$>0,1500$
K	0,0832	$>0,1500$
Na	0,1379	$<0,0100$
Al+H	0,1343	$<0,0100$
Ptotal	0,0962	$0,0960$
Pasim	0,1412	$<0,0100$
Ntotal	0,0810	$>0,1500$
COT	0,0670	$>0,1500$
MOS	0,0788	$>0,1500$
<b><i>Propiedades bioquímicas y microbiológicas</i></b>		
ADH	0,2931	$<0,0100$
ARG	0,0761	$>0,1500$
DAF	0,1017	$0,0646$
Ureasa	0,0901	$>0,1500$
BGlu	0,0724	$>0,1500$
Ptsa	0,0692	$>0,1500$
Casein	0,0885	$>0,1500$
Rbasal	0,0702	$>0,1500$
Cmic	0,0779	$>0,1500$

Tabla 2. Cuadrados medios y nivel de significancia de la prueba de homocedasticidad de Levene ( $p \leq 0,05$ ) para las variables físicas del suelo.

Fuente de variación	de gl	Cuadrados medios				
		%Hum	DA	%Arcilla	%Limo	%Arena
Entre grupos	11	17,90 ns	2,02 **	6,03 *	2,75 ns	2,93 ns
Intra grupos	60	9,68	0,07	2,58	2,59	4,20

gl: Grados de libertad; \*: Significativo ( $p \leq 0,05$ ); \*\*: Significativo ( $p \leq 0,01$ ); ns: No significativo ( $p > 0,05$ ).

Tabla 3. Cuadrados medios y nivel de significancia de la prueba de homocedasticidad de Levene ( $p \leq 0,05$ ) para las variables químicas del suelo

Fuente de variación	gl	Cuadrados medios												
		pH	CE	CIC R	Ca	Mg	K	Na	AL+H	Ptotal	Pasim	COT	Ntotal	MOS
Entre grupos	11	0,17* *	4276,2 **	22,06 ns	3,44 ns	0,13 ns	0,00 ns	0,00 *	0,09 **	8081,5 *	478,1 **	21,10 ns	0,002 ns	0,57 ns
Intra grupos	60	0,03	690,1	15,20	3,91	0,07	0,004	0,00	0,02	3564,2	166,00	19,24	0,001	0,62

gl: Grados de libertad; \*: Significativo ( $p \leq 0,05$ ); \*\*: Significativo ( $p \leq 0,01$ ); ns: No significativo ( $p > 0,05$ ).

Tabla 4. Cuadrados medios y nivel de significancia de la prueba de homocedasticidad de Levene ( $p \leq 0,05$ ) para las variables bioquímicas y microbiológicas del suelo.

Fuente de variación	gl	Cuadrados medios								
		ADH	ARG	DAF	Ureasa	BGlu	Ptsa	Casein	Rbasal	Cmic
Entre grupos	11	144117 **	5,78 **	4306,2 **	94,24 ns	1587,5 **	15674,6 ns	4707,4 ns	9,79 ns	5334,6 **
Intra grupos	60	16863,1	2,01	1110,3	87,74	547,5	10356,5	3511,8	2,01	1852,7

gl: Grados de libertad; \*: Significativo ( $p \leq 0,05$ ); \*\*: Significativo ( $p \leq 0,01$ ); ns: No significativo ( $p > 0,05$ ).

## ANEXO II

Tabla 1. Matriz de correlación de las variables estudiadas.

	Cmic	qCO2	qMic	qCO2_C	DH	AA	DAF	Ureasa	βglu	Ptsa	Casain	Pasim	PT	NT	COT	MOS	pH	CE	OCR	Ca	Mg	K	Na	Al+H	% Hum	DA	% arcilla	% limo	% arena	
Rbasal	,292	,727	,017	,299	,049	,167	-,092	,465	-,092	,151	,393	,320	,222	,388	,211	,415	,143	-,191	,055	,296	-,273	,216	-,010	,000	-,250	-,066	,149	-,309	,127	
Cmic		-,402	,701	-,386	,293	,256	,007	,149	,389	,147	,274	-,216	-,226	,015	-,008	,116	,306	-,021	-,096	,276	,032	,140	,128	-,314	,076	,169	,075	,288	-,276	
qCO2			-,412	,872	-,137	-,045	-,134	,314	-,318	,055	,169	,437	,338	,337	,131	,292	-,052	-,196	,067	,079	-,278	,070	-,082	,180	-,304	-,162	,105	-,448	,266	
qMic				-,079	,244	,204	-,052	,041	,265	-,078	-,146	-,389	-,345	-,311	-,678	-,327	,371	-,144	-,234	,120	,006	-,088	-,027	-,377	-,037	,319	,120	-,324	-,364	
qCO2_C					-,106	-,023	-,106	,225	-,311	-,121	-,093	,175	,146	,088	-,303	,003	,066	-,227	,000	,045	-,249	-,033	-,195	,050	-,350	-,020	,107	-,317	,154	
DH						,340	-,234	,439	,652	-,078	,041	-,312	-,422	-,063	-,059	-,048	,192	-,046	-,285	,199	-,241	-,066	-,007	-,131	-,350	-,016	-,151	,379	-,148	
AA							-,423	,672	,325	,122	,346	-,110	-,134	-,024	-,023	,010	,513	-,002	-,335	,470	-,295	-,082	-,096	-,378	-,288	,096	-,177	,439	-,170	
DAF								-,321	,042	-,140	-,347	-,199	-,163	-,090	,042	,041	-,312	,202	,407	-,265	,464	,462	,069	,211	,334	-,043	-,021	-,132	,134	
Ureasa									,147	,046	,312	,089	,068	,104	,055	,084	,420	-,312	-,390	,313	-,667	-,235	-,098	-,147	,492	,015	,055	,053	-,099	
βglu										,188	,195	-,225	-,288	,074	,027	,165	,120	,067	-,128	,264	,141	,115	,162	-,186	,067	-,032	-,221	,416	-,103	
Ptsa											,359	,334	,355	,418	,304	,393	-,162	,004	,390	,266	,206	,441	,166	,025	,484	-,186	-,072	-,137	,163	
Casain												,271	,210	,312	,436	,345	,290	-,072	-,240	,432	-,160	,001	,079	-,126	,116	-,065	-,129	,089	,064	
Pasim													,766	,441	,336	,346	-,253	-,125	,280	,043	-,007	,265	,220	,246	,225	-,212	,063	-,463	,296	
PT																														
NT																														
COT																														
MOS																														
pH																														
CE																														
CK_R																														
Ca																														
Mg																														
K																														
Na																														
Al + H																														
% Hum																														
DA																														
% arcilla																														
% limo																														