



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

POSGRADO EN CIENCIAS  
BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio de los nutrimentos y características  
edáficas en cafetales con diferentes grados  
de apertura del dosel en Pluma Hidalgo,  
Oaxaca

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
**(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**  
P R E S E N T A  
ELIZABETH FUENTES ROMERO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN

MÉXICO, D.F.

AGOSTO 2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.


Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez  
Director General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 4 de abril del 2005, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el examen de grado de Maestría en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental) de la alumna **Fuentes Romero Elizabeth** con número de cuenta **87254107** y número de expediente **3991111** con la tesis titulada: "**Estudio de nutrimentos y características edáficas en cafetales con diferentes grados de apertura del dosel en Pluma Hidalgo, Oaxaca**" bajo la dirección de la **Dra. Norma Eugenia García Calderón**.

Presidente:	Dr. Homero Julio Eudes Campo Alves
Vocal:	Dra. Christina Desirée Siebe Grabach
Secretario:	Dra. Norma Eugenia García Calderón
Suplente:	Dr. Hans Martin Ricker Reymann
Suplente:	Dr. Sergey Sedov

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F. a 6 de Julio del 2006

  
Dr. Juan Muñoz Farfán  
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del interesado

Dedicada a mi familia

A Emiliano, mi hijo, por ser mi luz

A mi madre, Graciela por todo su amor

A mi abuela Ana por su incansable andar

A mis hermanos y hermanas Memo, Marco, Margarita y Verónica  
por su apoyo, amor y comprensión

A Thomas, por su apoyo y cariño

## Agradecimientos

Quiero agradecer de manera especial a la Dra. Norma Eugenia García Calderón por la dirección de este trabajo de investigación; así como por su confianza y apoyo brindados en todo momento. Reconociendo su enorme esfuerzo invertido para el término de la tesis.

Agradezco al Dr. Martin Ricker, Dra. Christina Siebe, Dr. Sergey Sedov y al Dr. Julio Campo por formar parte de mi comité tutorial y por la revisión de este trabajo; así como por sus comentarios que fueron importantes para el mejoramiento y desarrollo del mismo.

Agradezco a la comunidad de Pluma Hidalgo por permitir llevar a cabo este estudio, sobre todo al los propietarios de las fincas las Cabaña y Vista Hermosa por todo el apoyo logístico facilitado para los muestreo.

Gracias a Abel, Aleida, Jessica y Rosalia; así como a mis queridos Noé, Andrés y Marco por contribuir en el trabajo de campo ya que con su presencia y entusiasmo hicieron agradable los muestreos.

Quiero agradecer al Dr. Almendros del Centro de Ciencias Medio Ambientales, Madrid, España por su apoyo y asesoría en el análisis de la respiración basal del suelo.

También quiero agradecer al Dr. Jorge Batlle de la Universidad de Valencia, España por la asesoría en el manejo y análisis de muestras de suelo mediante espectroscopia de absorción atómica; así como por la insuperable estancia en su laboratorio. Pero sobre todo por el cariño y amistad brindados en estos años de trabajo.

Agradezco en especial a Pavel krasilnikov por su orientación, formación y cariño incondicional durante estos años de trabajo con la tesis.

Gracias a la M. en C. María del Socorro Galicia porque que en algún momento del trabajo de análisis tuve discusiones sobre las técnicas empleadas en este trabajo. De manera particular agradezco a Consuelo Cano por su asistencia con el material y equipo en el laboratorio.

También quiero agradecer a mis amigos Víctor, Abel, Beatriz, Noé, Dr. Alberto Hernández y Sebastian por su apoyo, amistad, asesoría y cariño durante estos años.

Finalmente quiero agradecer a CONACYT por la beca, por proyecto, otorgada dentro del proyecto UNAM-CONACyT 28227B.

## ÍNDICE

<b>Agradecimientos</b> .....	VII
<b>Resumen</b> .....	IX
<b>Summary</b> .....	XI
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1 Prólogo .....	1
1.2 Los agroecosistemas cafetaleros .....	3
1.3 Importancia de la cobertura vegetal en la interacción con diferentes componentes biofísicos en los agroecosistemas .....	6
1.4 Procesos edáficos en los agroecosistemas .....	7
1.5 Características generales de la producción del café .....	9
1.6 Objetivos e hipótesis .....	11
<b>Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio</b>	
2.1 Ubicación fisiográfica .....	13
2.2 Caracterización ambiental de Pluma Hidalgo .....	17
<b>Capítulo 3. Material y métodos</b>	
3.1 Selección de los sitios de estudio .....	23
3.2 Muestreo de suelo .....	25
3.3 Mediciones de luz disponible .....	25
3.4 Evaluación de producción de café y colecta de especies arbóreas del agroecosistema.....	26
3.5 Determinación de parámetros edáficos .....	27
3.6 Análisis estadísticos .....	29
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	
4.1 Caracterización del agroecosistema cafetalero .....	30
4.2 Descripción morfológica de las unidades de suelo en los agroecosistemas cafetaleros .....	32
4.2.1 Caracterización de los Phaeozems .....	32
4.2.2 Caracterización de los Umbrisoles .....	37
4.2.3 Características de los Luvisoles .....	40
4.3 Caracterización física y química del suelo en el agroecosistema cafetalero .....	44
4.4 Caracterización del dosel y productividad en el agroecosistema cafetalero .....	65
4.5 Composición florística en el agroecosistema cafetalero .....	72
4.6 Productividad en el agroecosistema cafetalero en diferentes grupos de suelo .....	75
4.7 Relaciones entre las variables edáficas y el dosel en el agroecosistemas cafetaleros.....	78
4.8 Relaciones entre la productividad de la cereza del café y otros atributos del agroecosistema cafetalero a la sombra .....	83
<b>Capítulo 5. Discusión</b> .....	89
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	100

## RESUMEN

El trabajo tiene el objetivo de determinar la relación entre la variación de las propiedades del suelo y la cobertura del dosel; así como sus relaciones con la producción de cereza de café, en un agroecosistema cafetalero en la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca. El estudio se realizó considerando: (1) La morfología del suelo, las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial del suelo, (2) La apertura relativa del dosel, evaluada mediante la cantidad de luz disponible; así como la composición vegetal y, (3) La producción de cereza de café en diferentes grupos de suelo y condiciones de apertura del dosel. El agroecosistema cafetalero mostró una alta diversidad de suelos, donde los grupos dominantes fueron: Phaeozems, Umbrisoles y Luvisoles, una alta diversidad de especies de árboles de sombra (12 familias y 16 géneros en 625 m<sup>2</sup>) y una baja cantidad de luz disponible (0.05-0.20 mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>). Los Phaeozems tuvieron los horizontes superficiales más variables, ya que presentaron el mayor número de diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en sus propiedades entre sitios. Las diferencias fueron encontradas en la humedad, resistividad, pH, nitrógeno, calcio y magnesio. El suelo tuvo una alta respuesta a la apertura del dosel, ya que se establecieron relaciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre la apertura del dosel y las propiedades del suelo como el pH ( $r = -0.32$ ), nitrógeno total ( $r = -0.34$ ), C/N ( $r = -0.12$ ) y fósforo ( $r = 0.38$ ). La apertura del dosel fue baja, en los sitios, aunque se presentaron dos condiciones significativamente diferentes de luz disponible (0.04 y 0.14 mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>). Los Umbrisoles y Luvisoles tuvieron horizontes superficiales menos variables debido a la poca relación de las propiedades del suelo y la apertura del dosel; así como por las pocas diferencias significativas de sus propiedades, entre los sitios. Los Umbrisoles tuvieron pocas diferencias en sus parámetros edáficos, entre los sitios analizados. Las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) se establecieron por la humedad, pH, nitrógeno, potasio, y magnesio. Las condiciones de apertura del dosel no fueron contrastantes y la distribución de la luz disponible fue heterogénea, entre los sitios. Los Luvisoles fue el grupo más estable con pocas diferencias en sus propiedades físicas y químicas, entre sitios, su respuesta a los cambios de apertura del dosel fue baja. Las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre sitios se establecieron por la resistividad, calcio y magnesio. La respuesta de los Luvisoles a la apertura del dosel se reflejó en el cambio de la concentración del nitrógeno ( $r = -0.51$ ,  $p < 0.05$ ). La apertura del dosel entre sitios no fue contrastante y la distribución de la luz disponible dentro de los sitios fue gradual. La

apertura del dosel sólo influyó el nitrógeno mineralizable en Umbrisoles ( $p < 0.05$ ). Los índices de mineralización de la materia orgánica tuvieron diferentes patrones relacionado con la apertura del dosel. En Phaeozems, los patrones de mineralización fueron diferentes en la época seca y húmeda, mientras que en los Umbrisoles y Luvisoles los patrones fueron iguales en ambas épocas.

La productividad de la cereza de café no presentó diferencias significativas entre los sitios, en los diferentes grupos de suelo. En los Phaeozems la producción de cereza del café se relacionó de manera negativa con la apertura y con la resistividad, y positivamente con el pH, Nt, y  $Mg^{2+}$ . La productividad en Umbrisoles fue influenciada significativamente ( $p < 0.05$ ) por el calcio y magnesio. la productividad en Luvisoles fue influenciada significativamente ( $p < 0.05$ ), de manera negativa, por la resistividad y positivamente por la concentración de carbono.



## SUMMARY

The aim of this work was to determine the relationship between the variation of soil properties and of the canopy cover and their relationship with cherry coffee production in a coffee agroecosystem in Pluma Hidalgo, Oaxaca. The study was carried out by the analysis of: (1) soil morphology, physical and chemical properties of the surface horizon, (2) relative opening of the canopy measuring the quantity of available light, and also the vegetation composition, and (3) cherry coffee production at different soil groups and opening canopy conditions. The coffee agroecosystem showed high soil diversity with Phaeozems, Umbrisols and Luvisols as the main soil group; high diversity of shadow trees species (12 families and 16 genres at 625 m<sup>2</sup>); lowest opening of canopy (0.05 - 0.20 mol/m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>). Phaeozems had the most variable superficial horizons; they presented the highest significant difference ( $p < 0.05$ ) of their properties between the sites. The differences were found in the humidity, soil resistivity, pH, nitrogen, calcium and magnesium. The soil also had high response to the relative opening of canopy ( $p < 0.05$ ). The relationships were found between the opening of canopy and soil properties such as pH ( $r = -0.32$ ), nitrogen ( $r = -0.34$ ), C/N ( $r = -0.12$ ) and phosphorous ( $r = 0.38$ ). The opening of the canopy, in sites, was low and they showed up two conditions significantly different of available light (0.04 y 0.14 mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>), and besides, there was high variation in available light inside the sites. Umbrisols and Luvisols were less variable with lower relationship ( $p < 0.05$ ) between the soil properties and opening of canopy, and they presented the lowest significant differences of their properties between sites. Umbrisols had few differences in soil parameters between sites. Significant differences ( $p < 0.05$ ) was found between the sites were found for the humidity, pH, nitrogen, potassium, and magnesium. The opening of canopies was low and not contrasting, between de sites and the distribution of the available light inside the sites was heterogeneous. Luvisols were the most stable group with few differences in their physical and chemical properties between the places. The significant differences ( $p < 0.05$ ) between the sites were found for soil resistivity, calcium and magnesium. The Luvisols response to the opening of canopy was reflected only by change in the concentration of nitrogen ( $r = -0.51$ ,  $p < 0.05$ ). The open canopy was low and not contrasting and the distribution of the available light inside the sites was gradual. The open canopy influenced only the mineralizable nitrogen content in Umbrisols ( $p < 0.05$ ). The indexes of organic matter mineralization had different patterns related to that of the open canopy. In

Phaeozems the mineralization patterns were different in dry and humid season while in Umbrisols and Luvisols the patterns were equal in both seasons.

The productivity of cherry of coffee did not show significant differences between the sites with different soils. At Phaeozems the cherry coffee production was related negatively with the opening and resistivity, and positively with the pH, nitrogen and magnesium. The productivity at Umbrisols had negatively related significantly ( $p < 0.05$ ) with calcium and magnesium. The productivity at Luvisols had negatively related significantly ( $p < 0.05$ ) with soil resistivity and positively related significantly with organic carbon.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Prólogo

Los agroecosistemas cafetaleros presentan importantes interacciones entre sus componentes biológicos y ambientales debido a que mantienen y conservan diferentes elementos del ecosistema, al que se asocian (Moguel y Toledo, 1996). El manejo de especies vegetales de interés comercial y natural, en los cafetales, hace que estos sistemas productivos sean considerados como sistemas agroforestales (Stever, 1999; Rao *et al.*, 1998). Las características de este sistema productivo le atribuyen un bajo riesgo, bajo costo y bajo impacto sobre los recursos naturales; aunque la producción de café es baja (Stever, 1999). Desde el punto de vista económico, social y cultural, los agroecosistemas cafetaleros, en Latinoamérica, tienen gran importancia ya que han sido adoptados fuertemente dentro de los sistemas de producción agrícolas tradicionales. Esto conlleva a que prosperen bajo condiciones ecológicas contrastantes (Stever, 1999). En el caso de México, la producción y comercialización de café ha generado una entrada importante de divisas por lo que actualmente ocupa el sexto lugar de producción a nivel mundial (CNOOC, 2005; Stever, 1999; Moguel y Toledo, 1996).

Los agroecosistemas cafetaleros se establecen bajo diferentes condiciones ecológicas, de temperatura, altitud y tipos de suelo, siendo las condiciones tropicales las más propicias para el desarrollo de cultivo (Stever, 1999; Guzmán, 1988; Ramos *et al.*, 1982). Los agroecosistemas cafetaleros son considerados como sistemas eficientes desde el punto de vista ambiental (Moguel y Toledo, 2005). Los beneficios atribuidos a este sistema de producción se relacionan con la conservación de los recursos hídricos de las cuencas (Stever, 1999; Moguel y Toledo, 1996). Así como en los procesos de amortiguamiento de las condiciones microclimáticas, de luz y de sitio y mantiene el balance hídrico del suelo (Zamora y Chaterlan, 1999; Beer *et al.*, 1998; Jiménez y Golberg, 1982; Barradas y Fanjul, 1984). De manera particular, los agroecosistemas cafetaleros se han asociado a la conservación y mantenimiento de la estructura y composición de las

comunidades vegetales, sobre todo de las arbóreas (Moguel y Toledo, 2005; Soto-Pinto, 2001; Soto-Pinto, 1999; Velasco, *et al.*, 1990). En el caso de las comunidades animales se ha evidenciado que el manejo tradicional del café, a diferencia de otros sistemas agrícolas, mantiene el hábitat de aves, insectos, hormigas, avispas y arañas (Lotter, 2004; Perfecto *et al.*, 1996; Perfecto y Snellig, 1995).

El mantenimiento de los atributos del ecosistema inciden de manera importante en la calidad y producción del fruto del café (Nutma, 1941 en Golberg y Jiménez 1982; Roskoski 1982). Esto se relaciona con la reducción del estrés de las plantas de café, por lo que se ve disminuido el impacto fisiológico y anatómico resultante de la exposición de las plantas a intensidades lumínicas altas (Fonseca *et al.*, 1999; Ramos y Viñales, 1999)

Desde el punto de vista edáfico la sombra de los árboles, de los cafetales, reduce las temperaturas extremas del suelo, regula la humedad y la disponibilidad del agua, mantiene la fertilidad y disminuye la erosión (Beer *et al.*, 1999; Mogollón *et al.*, 1998; Jiménez-Ávila, 1982). Los principales procesos que mantienen la dinámica edáfica, en los agroecosistemas cafetaleros, son las aportaciones continuas de residuos orgánicos, el mantenimiento del proceso de humificación de la materia orgánica y la regulación de los nutrientes del suelo. De manera particular, el nitrógeno presenta una dinámica importante que se encuentra asociada a las especies fijadoras, de este elemento, las cuales son promovidas en este tipo de sistemas (Fernández *et al.*, 2003, Guzmán, 1988; Sánchez, 1984; Ramos *et al.*, 1982; Roskoski, 1982). La estrecha relación entre los diferentes elementos del agroecosistemas hace pensar que la variación de uno de sus elementos pueden influenciar al resto de elementos del sistema. Los cambios se han relacionado, sobre todo, con la productividad del café ya que se ha observado que hay una tendencia de cambio bajo diferentes condiciones de apertura del dosel (Romero-Alvarado, 2002). En cuanto al suelo se ha observado que en el cafetal con sombra incide en los procesos químicos relacionadas con la acidez, con la concentración de fósforo, calcio y potasio (Soto, 2005).

Los agroecosistemas cafetaleros han sido estudiados debido a que se les atribuye importantes beneficios ambientales y porque son considerados sistemas frágiles cuyos componentes pueden cambiar con pequeñas alteraciones del sistema. Una línea de investigación dentro de estos sistemas productivos han sido las relaciones entre el dosel y la productividad de café. En tanto que las relaciones entre el suelo y el dosel se basan en comparaciones entre los sistemas al sol y a la sombra (Velasco *et al.*, 1999, Soto, 2005).

Debido a la importancia que tiene este sistema productivo como alternativa agrícola, que propicia la conservación y manejo de los recursos, este trabajo pretende analizar si los cambios en la apertura del dosel pueden relacionarse con cambios de las propiedades del suelo y, como estos cambios influyen en la productividad de la cereza de café en un agroecosistema cafetalero. El presente estudio se llevó a cabo en la zona cafetalero de la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca.

## 1.2 Los agroecosistemas cafetaleros

Los sistemas productivos de café tienen una gran relevancia desde el punto de vista biológico debido a las interacciones entre sus componentes, particularmente en sistemas muy diversificados (Rao *et al.* 1998). Dentro del cultivo de café se encuentran diferentes sistemas de manejo los cuales dependen de las condiciones ecológicas, culturales y económicas de los productores. De manera general existen dos sistemas de producción de café, bajo sombra y a pleno sol. Los sistemas a la sombra tiene una cobertura vegetal que protege a los arbustos de café y se considera que tienen un bajo costo, un bajo riesgo y un reducido impacto en la degradación de los recursos, por lo que tiene beneficios ecológicos importantes (Perfecto y Ambrecht, 2002; Beer, 1999). El sistema de producción de café al sol se caracteriza por ser altamente productivo. En este sistema se emplean especies mejoradas, fertilizantes y pesticidas, por lo que conllevan un alto riesgo, excesivo costo y una alta degradación de los recursos (Stever, 1999).

La importancia del café a la sombra se debe a su importante variedad de sistemas de manejo, dentro de los que se encuentran el rusticano o de montaña y jardín de café. De manera particular, éstos son considerados como sistemas tradicionales de producción de café o agroecosistemas cafetaleros. Estos sistemas se conforman por un estrato arbóreo y arbustivo de especies de comunidades vegetales poco alteradas donde se introducen los arbustos de café (Moguel y Toledo 2000, Romero-Alvarado *et al.*, 2002). Otro tipo de cafetales con sombra son los policultivos comerciales y monocultivo de sombra los cuales se encuentran asociados a especies arbóreas de interés comercial ya sea maderable o frutícola (Moguel y Toledo, 1996). Dependiendo de la complejidad de elementos arbóreos asociados al café pueden ser considerados como sistemas agroforestales (Stever, 1999; Rao *et al.*, 1998).

Los agroecosistemas cafetaleros tienen importantes beneficios ya que se han asociado con el mantenimiento de los recursos hidrológicos, debido a que los cafetales

con sombra se establecen en zonas altitudinales elevadas, importantes en el proceso de captación de agua (Moguel y Toledo, 1996). Otro atributo del sistema productivo con sombra es que regula las condiciones microclimáticas. La cobertura que generan los árboles adultos influye relevantemente en la cantidad y calidad de luz disponible y genera pocas variaciones en la temperatura y humedad local (Stever, 1999; Parker, 1995). Además se le ha asociado a procesos de amortiguamiento microambiental, ya que se da una menor incidencia de heladas y condiciones microclimáticas extremas (Barradas y Fanjul, 1984). Esto posiblemente se encuentre relacionado con el hecho de que la sombra de los ecosistemas agroforestales disminuye las temperaturas diurnas y máximas (Matoso *et al.*, 2004).

Otro atributo importante del agroecosistema cafetalero es el mantenimiento de la biodiversidad (Perfecto *et al.*, 1996, Moguel y Toledo, 1999), ya que se asocian a un importante número de comunidades vegetales y animales (Romero-Alvarado *et al.*, 2002; Perfecto *et al.*, 1996). Las comunidades vegetales asociadas a los agroecosistemas cafetaleros son: la selva alta y mediana subcaducifolia, selva alta perennifolia, bosques templados y bosque mesófilo de montaña. En México, 14 zonas productoras de café con sombra están localizadas en áreas naturales destinadas a la conservación (Moguel y Toledo, 2005). Esta distribución refleja la conservación de la estructura y composición de las comunidades vegetales originales, a pesar de que en el sistema se contempla la selección y manejo de especies del dosel. En los cafetales con sombra la selección y la poda de árboles solamente disminuye en un 15% la cobertura original (Romero-Alvarado *et al.*, 2002; Soto-Pinto, 1999). Estas condiciones de apertura pueden ser comparativamente similares a las de comunidades vegetales poco alteradas en las que la cantidad de luz que se filtra a través del dosel es baja (Ricker *et al.*, 1999). Este sistema de manejo ha convertido a los agroecosistemas tradicionales en una propuesta alternativa de manejo (Romero- Alvarado *et al.*, 2002; Soto-Pinto, 1999).

Desde el punto de vista edáfico se considera que los cafetales a la sombra disminuyen el riesgo de erosión y mantienen la fertilidad (Rao *et al.*, 1998), sobre todo en los sitios de ladera con pendientes escarpadas y suelos tropicales muy desarrollados (Guzmán, 1988). La vegetación que sirve para amortiguar las condiciones climáticas, también genera raíces que retienen el suelo y disminuyen significativamente la erodabilidad y erosividad hídrica. Por el contrario en los cultivos de subsistencia que

carecen de vegetación, el suelo descubierto se erosiona rápidamente convirtiéndose en un factor limitante para la productividad (Crasweell *et al.*, 1998).

Otro aspecto que mejora sustancialmente, manteniendo la vegetación, es la concentración de carbono y nitrógeno, ya que el aporte de hojarasca y residuos orgánicos mejora los niveles nutrimental del suelo (Beer *et al.*, 1998, Vitousek *et al.*, 1982). En el caso de sistemas cafetaleros en los que la vegetación forma diversos estratos se ha encontrado una importante relación entre la materia orgánica del suelo y la concentración de nitrógeno total, atribuido a la diversidad de fuentes que aportan la materia orgánica al suelo (Romero-Alvarado *et al.*, 2002). Esto también se asocia a la presencia de especies que fijan y aportan nitrógeno al suelo, sobre todo en sitios considerados como distróficos (Roskoski, 1982; Mogollón *et al.*, 1998), ya que estas especies generan un aumento en la concentración de nitrógeno disponible debido al aporte continuo de este elemento (Mogollón *et al.*, 1998).

En los cafetales a la sombra, la materia orgánica (relevante en la fertilidad del suelo) tiene una importante tendencia hacia a la humificación en constaste con las cafetales al sol (Velasco *et al.*, 1990). La dinámica de humificación en los agroecosistemas cafetaleros es muy compleja ya que se ha observado que en presencia de vegetación natural se forman más ácidos fúlvicos que húmicos, esto sobre todo en sitios con vegetación secundaria (Watanabe *et al.*, 2001; Ibáñez *et al.*, 2001; Ticante *et al.*, 1993). La estructura de los ácidos fúlvicos en estos ambientes se encuentra alterada por el manejo, por lo que su composición se basa en sustancias húmicas y no húmicas (Watanabe *et al.*, 2001). En tanto que los ácidos húmicos son poco maduros y poco evolucionados, a pesar de que la tendencia general bajo sombra es el aumento de los procesos de condensación de las sustancias húmicas. La escasa maduración de las sustancias húmicas ocasiona una menor formación de complejos edáficos estables (órgano-minerales). Esto impacta de manera importante la estabilidad del sistema, en comparación con sistemas naturales donde el proceso de humificación es mayor (Velasco *et al.*, 1990).

La dinámica de mineralización de la materia orgánica en cafetales a la sombra son similares a los bosques secundarios ya que se ha observado que los cafetales a la sombra, que tienen importantes procesos de recuperación natural. En este caso las relación C/N muestra que hay un menor contenido de carbono que de nitrógeno en el suelo relacionado con un rápido reciclamiento de nutrimentos (Tapia-Coral *et al.*, 2005; Watanabe *et al.*, 2001).

Finalmente en cuanto a los nutrimentos del suelo, si bien se han encontrado relaciones entre la materia orgánica del suelo (MOS) y el nitrógeno total, no se tiene una relación clara con otros nutrimentos (fósforo, potasio, calcio y magnesio) ya que pueden ser poco susceptibles a la diversificación de las fuentes orgánicas (Romero-Alvarado *et al.*, 2002), aunque se ha observado que en el mantillo puede ser una reserva importante de elementos como el calcio, magnesio, potasio (Tapia-Coral *et al.*, 2005). Aunque es importante mencionar que las concentraciones de estos elementos tienen que ver con el material parental, con los procesos de intemperismo, lavado de nutrimento, entre otros, relacionados con la evolución del suelo (Dijkstra, 2001).

### **1.3 Importancia de la cobertura vegetal en la interacción de diferentes componentes biofísicos en los agroecosistemas.**

La cobertura vegetal tiene una importante interacción con otros elementos biofísicos por lo que influye en la dinámica del agroecosistema (Dijkstra, 2001; Rao *et al.*, 1998). Las características estructura de la vegetación interactúan con el ambiente físico ya que se relaciona con la atmósfera y con el ambiente de los bosques (Parker, 1995). Los atributos de la vegetación son la modulación de la radiación y la evolución de los gases; así como el intercambio de energía y masa con la atmósfera. De ahí que el dosel sea un importante reservorio de energía, una fuente importante de vapor de agua y de carbono (Fitzjarrald y Moore, 1995).

Otra importante interacción de la vegetación se presenta con el suelo ya que regula parte de los procesos físicos, químicos y biológicos relacionados con la fertilidad del suelo (Rao *et al.*, 1998). El dosel contribuye al mantenimiento de la humedad edáfica (Uehara y Gillman, 1981 en Henrot y Robertson, 1994) y es una importante fuente de energía para los microorganismos; así como interviene en los procesos de formación, conservación, regeneración del suelo (Porta *et al.*, 2003).

En la dinámica de interacción con el suelo, el dosel aporta residuos orgánicos mediante la hojarasca. Esto tiene implicaciones en la dinámica de la materia orgánica (MOS) ya que regula su entrada y calidad; así como contribuye en la formación de capas húmicas en el suelo. Esto repercute de manera directa en el reservorio de nutrimentos, que se relaciona con fuentes orgánicas, a corto y largo plazo (Frangi y Lugo, 1991; Lodge y MacDowell, 1991; Allen, 1985). En el caso donde el mantillo se encuentra dominado por materiales orgánicos de especies pioneras, sitios con crecimiento secundario, se presenta



un alto contenido de carbono y un bajo contenido de otros nutrimentos como potasio y calcio. En el caso de sitios con multiestratos, como son los sistemas agroforestales, los niveles nutrimentales en el suelo se encuentran fuertemente relacionados con la diversificación de especies. En estos casos se ha observado que la concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio, así como las reservas de estos nutrimentos pueden ser altos en el mantillo. Esto conlleva a una importante calidad nutrimental de los sistemas agroforestales diversificados, asociados con una mayor descomposición y reciclamiento de nutrimentos que se refleja en la relación C/N, en este tipo de sistemas (Tapia-Coral *et al.*, 2005).

Los cambios de la vegetación en los ecosistemas tropicales se encuentran sujetos a varios factores, uno de estos es el cambio de uso de suelo. Este proceso puede causar la pérdida total o parcial de la cobertura vegetal como en el caso de la agricultura de subsistencia o en los agroecosistemas forestales. En el caso de los sitios bajo manejo, donde la vegetación tiene un papel importante, como sombra, la apertura de la vegetación llega a ser muy baja. La principal razón de la apertura se debe a la selección de especies para sombra y el corte de ramas de los árboles para el ligero aclareo de los sitio (Romero-Alvarado, *et al.*, 2002; Soto-Pinto, 1999). Otro factor importante en los cambios en la vegetación son los eventos naturales (como huracanes) que pueden provocar una apertura del dosel hasta del 84% debido al daño o muerte de los árboles (Vogt *et al.*, 1996). La disminución de la cobertura vegetal tiene repercusión directa sobre el suelo y esto se ve reflejado en el cambio de su fertilidad (Rao *et al.*, 1998).

#### **1.4 Procesos edáficos en los agroecosistemas**

Los cambios en las propiedades del suelo se encuentran asociados a los diferentes procesos de degradación natural y antrópica de los elementos del ecosistema. En las zonas tropicales el suelo tiene una alta susceptibilidad a la degradación. Esto se debe a la elevada tasa de erosión causada por la alta precipitación y por la disminución de cobertura vegetal (Lodge, 1991; Sanford *et al.*, 1991; Scatena *et al.*, 1991; Mass y García-Oliva, 1990). Es importante mencionar que hay otros factores que modulan la respuesta del suelo a la erosión y a la pérdida de vegetación. Dentro de los principales factores se encuentran los efectos locales de temperatura, tipo de vegetación, descomposición de la materia orgánica, homeostasis de los ciclos biogeoquímicos, edad de los suelos y relieve (Rao *et al.*, 1998; Bohn *et al.*, 1985; Vitousek *et al.*, 1982).

La dinámica de los sitios con pérdida de la cobertura vegetal puede resultar en la disminución de la concentración de nitrógeno, carbono y fósforo. Esta pérdida puede deberse al lavado de elementos así como a la disminución de la actividad biológica del suelo (Masciandaro *et al.*, 1998; Saikh *et al.*, 1998). La disminución del carbono orgánico del suelo se debe a un aumento de la actividad biológica y a la pérdida de las fuentes de aporte de este elemento. Dentro de éstas se encuentran el mantillo y los sistemas radiculares (Henrot y Robertson, 1994).

En las zonas perturbadas las raíces tienden a disminuir en poco tiempo, debido cambio en la humedad edáfica y al estrés ocasionado por la exposición directa. Los cafetos son heliofabas, aunque la floración se encuentra estimulada por la luz solar directa, aunado a un manejo de fertilidad puede mantener una buena productividad (Decroix y Snoeck, ). La recuperación del sistema radicular es continua pero muy lenta; posiblemente se requiera más de un año para recuperar esta fuente de materia orgánica del suelo (Silver *et al.*, 1996; Parrotta y Lodge, 1991).

La disminución del mantillo se relaciona con el aumento en su tasa de descomposición, por la pérdida del dosel y disminución del aporte de la hojarasca. La velocidad de descomposición depende de la calidad de los residuos (cantidad de elementos lábiles). Esto involucra la mineralización de la MOS por organismos heterotróficos que utilizan la energía de oxidación del carbono para su metabolismo, por lo tanto, se ve influenciada la reserva de carbono orgánico del suelo. El carbono se encuentra en productos microbianos, carbohidratos, proteínas, sustancias lipídicas, ligninas, taninos, sustancias húmicas, así como fracciones de raíces, tallos, hojas. En este caso los compuestos lábiles como carbohidratos, proteínas, sustancias lipídicas, entre otras son las que contribuyen a la rápida descomposición de la MOS (Porta *et al.*, 2003; Stevenson y Cole, 1999). En tanto que los compuestos recalcitrantes como los polifenoles y ligninas; así como compuestos producidos por resíntesis microbiana forman parte de las reservas de carbono (Bohn, 1985). Debido a la diversidad de compuestos, el carbono orgánico del suelo (COS) tiene diferente tasa de retorno, por lo que las alteraciones en las fuentes de carbono repercuten en la reserva de este elemento (Blair *et al.*, 1999). Lo anterior se ve reflejado en las reservas lábiles de carbono que tienden a disminuir en sitios perturbados (Blair *et al.*, 1999; Henrot y Robertson, 1994).

La disminución en los aportes de MOS bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad, tienden a disminuir de manera directa el aporte nutrimental. Las bases del suelo

tienden a cambiar por el desplazamiento de protones producidos por la descomposición de la MOS, exudados de las raíces, lavado de nutrimentos del mantillo y suelo (Tapia-Coral *et al.*, 2005).

### **1.5 Características generales de la producción del café**

Los agroecosistemas cafetaleros se establecen en sistemas montañosos dentro de una alta gama de comunidades vegetales y bajo diferentes condiciones climáticas, siendo las tropicales las más adecuadas para la producción (Moguel y Toledo, 2005). El café puede desarrollarse en una gran variedad de suelos originados a partir de cenizas volcánicas, basaltos, granitos, gneiss, areniscas, entre otros (Geus, 1976 en Sánchez, 1984; Guzmán, 1988; Ramos *et al.*, 1982), aunque se reconoce que los mejores suelos para la producción de café son los que se originan a partir de cenizas volcánicas (Andosoles). Los Andosoles al parecer proporcionan mejores características de calidad del café como: acidez potencial y cuerpo (Coffee Research Newsletter, 2000). Otros grupos de suelos con una importante extensión de producción de café son los Luvisoles, Cambisoles, Umbrisoles, Phaeozems, Acrisoles y Lixisoles (García-Calderón *et al.*, 2000, Ramos *et al.*, 1982). Las condiciones edáficas propicias para el desarrollo del café son: suelos ácidos (pH entre 4 a 6), alto contenido de materia orgánica, suelos porosos y profundos, con textura franca a franca arcillosa y friables. Estas condiciones permiten el balance adecuado de O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, importante para la actividad biológica y para el sistema radicular de los cafetos (Guzmán, 1988; Ramos *et al.*, 1982).

Otros factores que influyen en el rendimiento y calidad el café son: la altitud, la humedad, las diferencias absolutas en las temperaturas diurnas y nocturnas (Coffee Research Newsletter, 2000); así como la exposición de los cafetos a la radiación solar. La exposición de los cafetos a intensidades lumínicas altas provoca una disminución en la transpiración, por el cierre se los estomas, en tanto que bajo condiciones de baja luminosidad se da un incremento a la par de la transpiración y fotosíntesis (Nutma, 1941 en Jiménez y Golberg, 1982). También se ha observado que en altas intensidades lumínicas se presentan cambios en las características anatómicas de las hojas de café (Fonseca *et al.*, 1999); así como una importante disminución de la calidad del fruto relacionado con el tamaño de la semilla (Ramos y Viñales, 1999).

En los cafetales con sombra se presenta una disminución en la cantidad de ramas y hay una baja producción foliar, aunque las hojas tienen una mayor talla y mayor

persistencia. Así mismo, se ha encontrado una floración temprana, baja presencia de nodos productivos y pocos botones florales; esto da en consecuencia una baja producción de cereza (Matoso *et al.*, 2003). Aunque se ha observado que la mejor calidad de café relacionado con la acidez y cuerpo se presenta en cafetales a la sombra (Coffee Research Newsletter, 2000). Los cambios fisiológicos y anatómicos, en los cafetos bajo sombra, se encuentran relacionados con las bajas temperaturas diurnas y con la temperatura máxima presentes (Matoso *et al.*, 2003). Otro factor importante en la productividad del cafetal es la cantidad de agua disponible en el suelo. Los excesos y las deficiencias hídricas regionales afectan las condiciones óptimas de producción de café, el límite inferior se ubica entre los 1000 y 1100 mm de agua disponible en el suelo (García y Montoya, 2003).

La producción y calidad del café también depende de las especies y variedades que se manejen en el agroecosistema. El café pertenece al género *Coffea* de la familia Rubiaceae y está compuesta por 70 especies, que se encuentran distribuidas por todo el mundo. Se trata de plantas de tipo arbustivo perenne, de aproximadamente de 12 a 15 m de altura. Las hojas son opuestas con el borde ondulado y el ápice ligeramente acuminado. Las flores son de color blanco que se agrupan en las yemas axilares constituyendo verticilos de 8 a 15 flores, cada una de ellas se encuentra sostenida por un pedúnculo. El cáliz se encuentra compuesto por 5 brácteas que recubren el ovario. El fruto es una drupa (cereza) con un tamaño entre 10 y 15 mm de diámetro por 18 mm de largo, su forma es ovoide subglobosa. El fruto se encuentra constituido por el exocarpo, mesocarpo carnoso (pulpa) y dos semillas. Estas últimas difieren en forma, dependiendo de la variedad, su tamaño varía de 6 a 7 mm de ancho, 10 mm de largo y de 3 a 4 mm de espesor.

El origen de la planta se determina en Etiopía donde las condiciones de producción se encuentran en un rango de temperatura media de 17 a 20° C y una precipitación anual entre 1500 y 2000 mm. Las especies de mayor importancia económica son: *Coffea arabica* (Linn), *C. canephora* (Perre ex Frohener), *C. liberica* (Bull ex Hiern) y *C. excelsa* (A. Chev). Las variedades que tienen mayor demanda de comercialización son Robusta, Typica, Bourbon, Mundo Novo, etc (Coffee Research Newsletter, 2000; INMECAFE, 1990; Guzmán, 1988).

El cultivo de café se introdujo en México en el siglo XVIII desde Cuba. Sin embargo, este cultivo se vuelve relevante hasta el s. XIX debido al aumento de las exportaciones hasta convertirse en un producto importante para el país debido a la generación de divisas

(Guzmán, 1989, CNOC, 2005), por lo que México tiene un importante producción de café que lo ha llevado a ser el sexto productor de café a escala mundial (después de Brasil, Colombia, Indonesia, Vietnam e India). La ventaja económica del cultivo de café hizo que fuera adoptado fuertemente dentro de los sistemas de cultivo tradicionales. Debido a ello su producción se lleva a cabo en diferentes escalas desde grandes fincas cafetaleras tecnificadas hasta medianos y pequeños productores (Moguel y Toledo, 1996). Las zonas de producción de café en el país abarcan desde la frontera con Guatemala hasta el estado de Nayarit. Las principales regiones productoras de café son la vertiente del Golfo de México, Océano Pacífico, región Soconusco y región centro norte de Chiapas (INMECAFE 1990).

Uno de los estados importantes en la producción de café es Oaxaca ya que ocupa el tercer lugar de producción nacional. Las principales regiones cafetaleras se encuentran distribuidas en la Sierra Sur de Oaxaca (SSO), Sierra Norte, Sierra Mazateca y una pequeña porción del Istmo de Tehuantepec. En esta entidad se encuentran participando 55,291 productores en cerca de 173,7654 Ha con una producción de 6.21 Qq por Ha, aproximadamente 736,420 costales de café pergamino (Consejo Mexicano de Café, 1998). Actualmente el cultivo de café se encuentra sometido a un sinnúmero de presiones siendo las económicas las más fuertes, lo que ha causado el abandono de este producto agrícola. Las zonas cafetaleras, actualmente están siendo transformadas en cultivos de subsistencia o pastizales lo cual podría causar severos cambios en los elementos de los agroecosistemas con los que se encuentra estrechamente relacionado como son la vegetación y el suelo.

Las relaciones entre la cobertura vegetal y las propiedades del suelo tienen una gran relevancia como indicadores de cambios en los agroecosistemas. Particularmente en los sistemas cafetaleros las relaciones entre el suelo y la vegetación podrían indicar las condiciones del agroecosistema lo cual podría determinar si este sistema productivo puede ser considerado como un sistema alternativo dentro del manejo de los recursos naturales.

## **1.6 Objetivos e hipótesis**

Los agroecosistemas cafetaleros tienen una gran complejidad debido a los componentes que los conforman y a las interrelaciones entre ellos, por lo que se ha considerado un sistema agrícola ambientalmente eficiente. Los cambios en la composición de algunos de

sus elementos, por actividad antrópica o eventos naturales, hacen que haya un mosaico de condiciones en el dosel y el suelo que pueden influir en la productividad del cafetal. La fuerte relación entre los diferentes componentes podría indicar la fragilidad del agroecosistema cafetalero. Debido a lo anterior este trabajo se planteó el siguiente objetivo general: Conocer la variación de las propiedades del suelo y de la producción de cereza del café en relación con las diferentes condiciones de apertura del dosel en un agroecosistema cafetalero en la Sierra Sur de Oaxaca.

#### Objetivos particulares

1. Describir la diversidad edáfica y la variabilidad de las propiedades del suelo en un agroecosistema cafetalero.
2. Caracterizar la variabilidad de condiciones del dosel en el agroecosistema cafetalero, mediante un análisis de la luz disponible y composición de especies.
3. Caracterizar la producción de la cereza de café bajo diferentes mosaicos de condiciones de suelo y cobertura vegetal.
4. Determinar la relación entre la variación de las propiedades del suelo y las condiciones del dosel en un agroecosistema cafetalero.
5. Determinar la relación entre la productividad, las condiciones del suelo y los atributos del dosel en un agroecosistema cafetalero.

De acuerdo con las variaciones en el suelo y en los atributos del dosel en los agroecosistemas cafetaleros, se plantearon las siguientes hipótesis para determinar la dinámica de estos agroecosistemas.

1. Se espera que las variaciones de las propiedades de suelo se encuentren relacionadas con los cambios en los atributos del dosel que le sirve de sombra.
2. Las propiedades de suelo más dinámicas como el nitrógeno potencialmente mineralizable, respiración del suelo y fósforo disponible tendrán una mayor correlación con la apertura relativa del dosel.
3. La productividad de la cereza del café se relacionará con las condiciones de apertura del dosel.
4. Se espera que la productividad tenga una alta relación con las propiedades del suelo. En particular una relación positiva con la humedad del suelo, nitrógeno, fósforo, potasio, acidez y contenido de bases del suelo.
5. La productividad del cafetal tendrá una relación negativa con la resistividad del suelo.

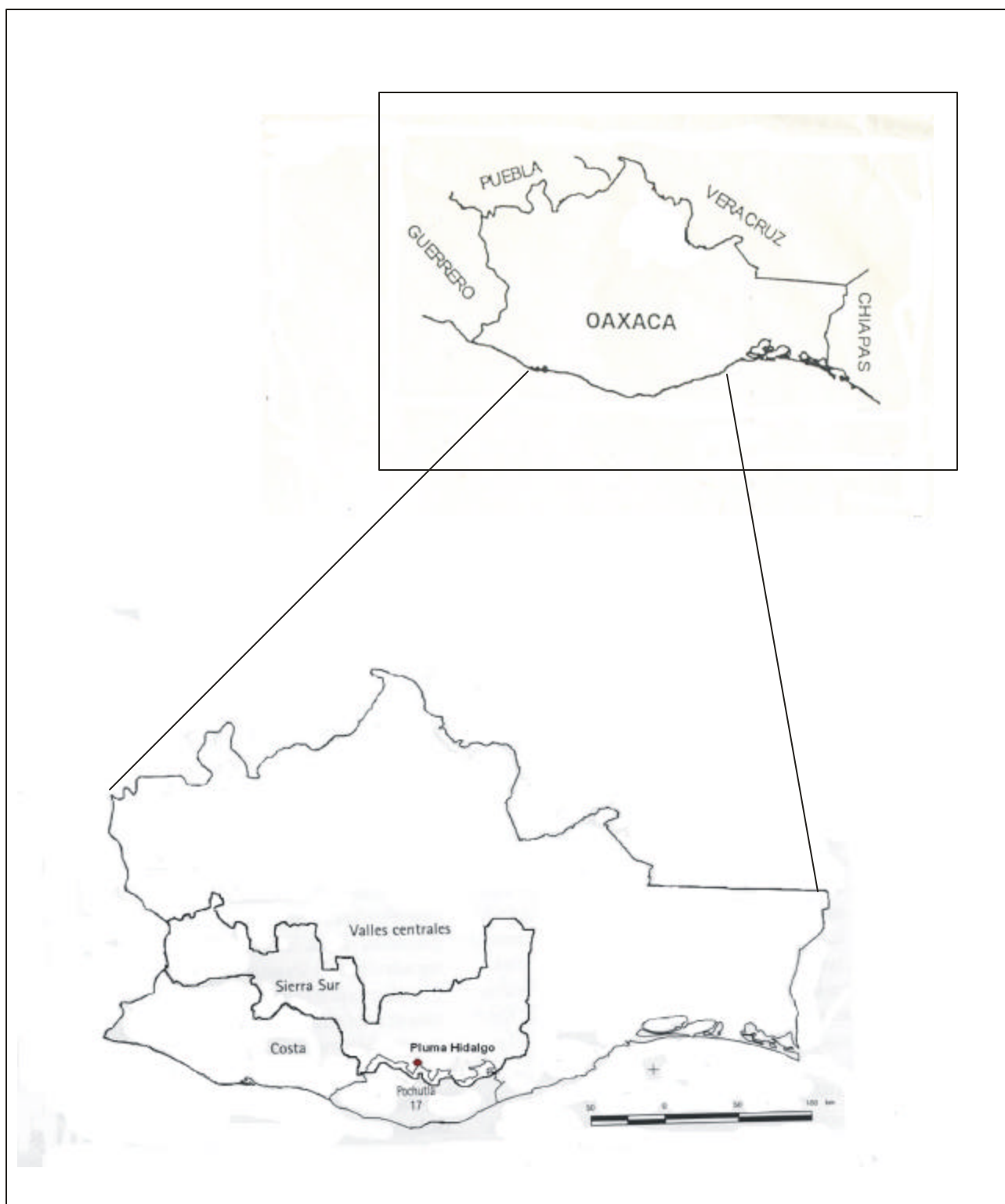
## CAPÍTULO 2

### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la zona cafetalera de la comunidad de Pluma Hidalgo, que se encuentra en el distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca. La región se encuentra enclavada en la zona cafetalera de la Sierra Madre del Sur (Figura 1). A continuación se describen las características del ambiente físico y biológico del sitio de estudio.

#### 2.1 Ubicación fisiográfica

El sitio de estudio se localiza geográficamente dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, en una zona transicional, entre las subprovincias de las sierras centrales de Oaxaca, que corren hacia el norte de la entidad, y la subprovincia de la cordillera costera del sur, que se extiende en dirección de noroeste a sur. La zona de estudio se encuentra limitada al este por las sierras orientales, al oeste por la costa del sur; al sur por las sierras y valles de Oaxaca y al norte por la Mixteca alta (INEGI, 1997a). La Sierra Madre del Sur tiene una extensión aproximada de 12,350 km y se caracteriza por tener un paisaje montañoso con elevaciones altas (>2000 m snm), en la porción central, y de tamaño medio en la porción occidente (sitios con altitudes < 2000 m snm). Debido a estos rasgos fisiográficos los intervalos de las pendientes van de los 18 a 30° de inclinación (Ortiz *et al.*, 2004). Las condiciones de relieve son el reflejo de los procesos morfoestructurales complejos que dieron forma a la Sierra Madre del Sur. Esta se formó a partir de fallas orográficas (falla de Chacalapa) que dieron origen a un paisaje tectónico durante el Eoceno-Mioceno (Moran *et al.*, 1996) y por eventos menores ocurridos en el Plioceno y el Cuaternario (Hernández *et al.*, 1996). Las condiciones heterogéneas del paisaje pueden asociarse a una importante diversidad de climas que van de húmedos a templados en sus vertientes costeras (Trejo, 2004).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la zona de estudio en la Sierra Sur de Oaxaca. La zona cafetalera de Pluma Hidalgo se encuentra en los límites entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur y de la costa del sur. Pluma Hidalgo se localiza dentro del Distrito de Pochutla, Oaxaca.



La Sierra Madre del Sur es considerada como activa ya que continúa con el proceso de levantamiento debido al desplazamiento de la placa de Chortis, hacia el sur, y por el establecimiento de una zona de subducción. Este proceso geológico ha modificado de manera importante las condiciones fisiográficas y climáticas en la zona desde hace 20 millones de años (Centeno-García, 2004). Este rasgo geológico provoca que la zona presente actividad sísmica frecuente, debido a la influencia de la Placa de Cocos y de la zona sísmica de Pinotepa Nacional de Guerrero-Oaxaca. De acuerdo con la regionalización sísmica de la república mexicana, el sitio de estudio está influenciado por las áreas sísmicas C y D, consideradas con actividad sísmica moderada y alta. Los movimientos tectónicos son de gran velocidad a causa de la subducción de las placas bajo la parte continental de Centroamérica, a lo largo de la fosa mesoamericana. En esta región se han registrado sismos intensos, de carácter histórico, con una ocurrencia de tipo frecuente donde la aceleración del suelo puede sobrepasar el 70%. En general, la magnitud máxima de los sismos ha sido de aproximadamente 7° en la escala de Richter y los movimientos son considerados como superficiales, ya que se establecen a una profundidad de 60 km de la corteza terrestre (clasificación sísmica mexicana, 2002).

La zona de estudio se encuentra influenciada procesos ciclogénicos de gran importancia, siendo el Istmo de Tehuantepec el punto con mayor incidencia. Dentro de ésta se forman aproximadamente el 17% de los ciclones que ocurren anualmente en México (Musk, 1992). Dentro de los registros históricos de ciclones para la costa sur de Oaxaca, a partir de 1997 a 2003, muestran que 1997 fue el año más activo ya que en se impactaron, de forma consecutiva, tres ciclones Olaf, Pauline y Rick; siendo el de mayor intensidad "*Pauline*" con una categoría de 4, de acuerdo a la escala Saffir-Simpson (CNA-SMN, 2004); así como el que tuvo un gran impacto en la Sierra Sur, que constituyó una barrera para detener el paso del huracán a la zona central del país. Las principales cuencas afectadas por "*Pauline*" fueron la barra de Coyula donde se encuentran los municipios de Pluma Hidalgo, Sn. Mateo Piñas, Sta. María Huatulco, Sn. Pedro Pochutla, entre otros (CONABIO, 2004)

## LITOLOGIA

La litología en la Sierra Sur de Oaxaca es compleja ya que se presenta una gran variedad de materiales, dominados por rocas metamórficas. Los materiales se formaron a partir del

Precámbrico (1000 a 750 Ma, por lo que es la región más antigua de Oaxaca) hasta, por lo menos, el Eoceno-Mioceno (5 Ma); estos materiales tienen una orientación N30-70° E. Los materiales geológicos más abundantes son las rocas metamórficas cristalinas que presentan un bandeamiento mineral bien desarrollado. Entre éstas se encuentran los ortocuarzofeldespatos, mármoles, gneiss, granulitas y meta-anortositas (Ortega, 1993) que pertenecen al complejo Oaxaqueño. Además, la zona se encuentra influenciada por el complejo Xolalpa (INEGI, 1997b, Ferrusquía-Villafranca, 1998) donde los materiales son del Cretácico, predominantemente, rocas migmatitas; estos materiales se extienden en la mayor parte de las subprovincias de las cordilleras de la costera sur y la costa sur (INEGI, 1987a). Otros materiales que posiblemente se encuentren dentro de esta provincia fisiográfica son rocas del Jurásico tales como: esquistos, migmatitas y rocas ígneas intrusivas ácidas; así mismo se encuentran anfibolitas del Paleozoico y granitos del Cenozoico (Hernández *et al.*, 1996). Además se encuentra una capa profunda de materiales fuertemente intemperizados rica en feldespatos (INEGI, 1997b).

Otros elementos importantes dentro de la geología estructural son las fallas y fracturas de tipo normal con rumbo, predominantemente, de norte-sur. La presencia de materiales como el gneiss y esquistos favorecen la formación de estos rasgos ya que presentan foliación con orientaciones norte-noroeste con un ángulo de 50 a 80°. Una de las fallas importantes en la zona corre cerca del cerro Huatulco (INEGI, 1997a).

## VEGETACION

En cuanto al tipo de vegetación en la sierra madre del sur se describe una asociación entre la selva mediana subcaducifolia (Rzedowski, 1978) y la selva alta o mediana subperennifolia (Torres-Colin, 2004). En el caso de la selva mediana subcaducifolia, en la actualidad sólo se presentan relictos. Esta se establece a una altura de 10 a 500 m snm donde las condiciones climáticas son cálidas y el suelo es arenoso. Las características de la vegetación son estratos arbóreos con una altura de 15 a 30 m. La selva mediana subperennifolia tiene una mayor distribución, estableciéndose en la zona de Pluma Hidalgo, presenta una diferenciación entre los estratos, donde los de mayor talla se establece de 20 a 30 m, el estrato medio oscila entre 10 a 15 m y, finalmente un estrato arbóreo bajo de 3 a 8 m (Torres-Colín, 2004).

## 2.2 Caracterización ambiental de Pluma Hidalgo

La comunidad de Pluma Hidalgo se encuentra en el distrito de Pochutla, Oaxaca; se localiza geográficamente a los 15° 54'48" LN y 96° 23'19" LO. Esta región presenta un paisaje montañoso que se forma a partir de procesos tectónicos estructurales característicos de la Sierra Madre del Sur. Debido a esto, las principales unidades de relieve se encuentran representadas por laderas complejas y abruptas. Estas condiciones tienen una fuerte influencia en la variabilidad de los suelos (Krasilnikov *et al.*, 2005); así como un mosaico complejo de condiciones ambientales físicas y biológicas.

Los sitios de estudio se encuentran dentro de las fincas cafetaleras La Cabaña y Vista Hermosa, a una altitud aproximada entre 700 a 800 m snm (Figura 2); se establecen en la porción media de laderas complejas que presentan una orientación suroeste y tienen una inclinación de 40°. Otra condición de las laderas, al igual que el sistema de barrancas, a las que se asocian, es que son considerablemente estables debido al importante balance entre los procesos morfogenéticos y pedogenéticos. La estabilidad de las unidades de relieve se ha asociado al hecho de que se encuentran vegetadas (Krasilnikov *et al.*, 2005).

Debido a la complejidad en el paisaje se presenta un mosaico de suelos con diferente estado de desarrollo. De acuerdo con el INEGI (1997) en la zona de estudio se encuentra una asociación de unidades de suelo dentro de los que encuentran: Cambisoles crómicos, Luvisoles ócricos y Luvisoles crómicos. Estos se caracterizan por presentar una textura pesada debido a que la fracción mineral más abundante es la arcilla. De acuerdo con García *et al.* (2000) hay una mayor diversidad de grupos de suelos en la región de Pluma Hidalgo ya que se encuentran asociaciones entre Alisoles, Phaeozems, Umbrisoles y Cambisoles, de acuerdo con la clasificación de la World Reference Base (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Estas unidades de suelo siguen una secuencia de desarrollo; entre los maduros se encuentran los Alisoles, los moderadamente desarrollados Phaeozems lúvicos y los que presentan un desarrollo incipiente como los Phaeozems flúvicos y esqueléticos; finalmente, los más jóvenes son los Umbrisoles y Cambisoles (García-Calderón *et al.*, 2006).

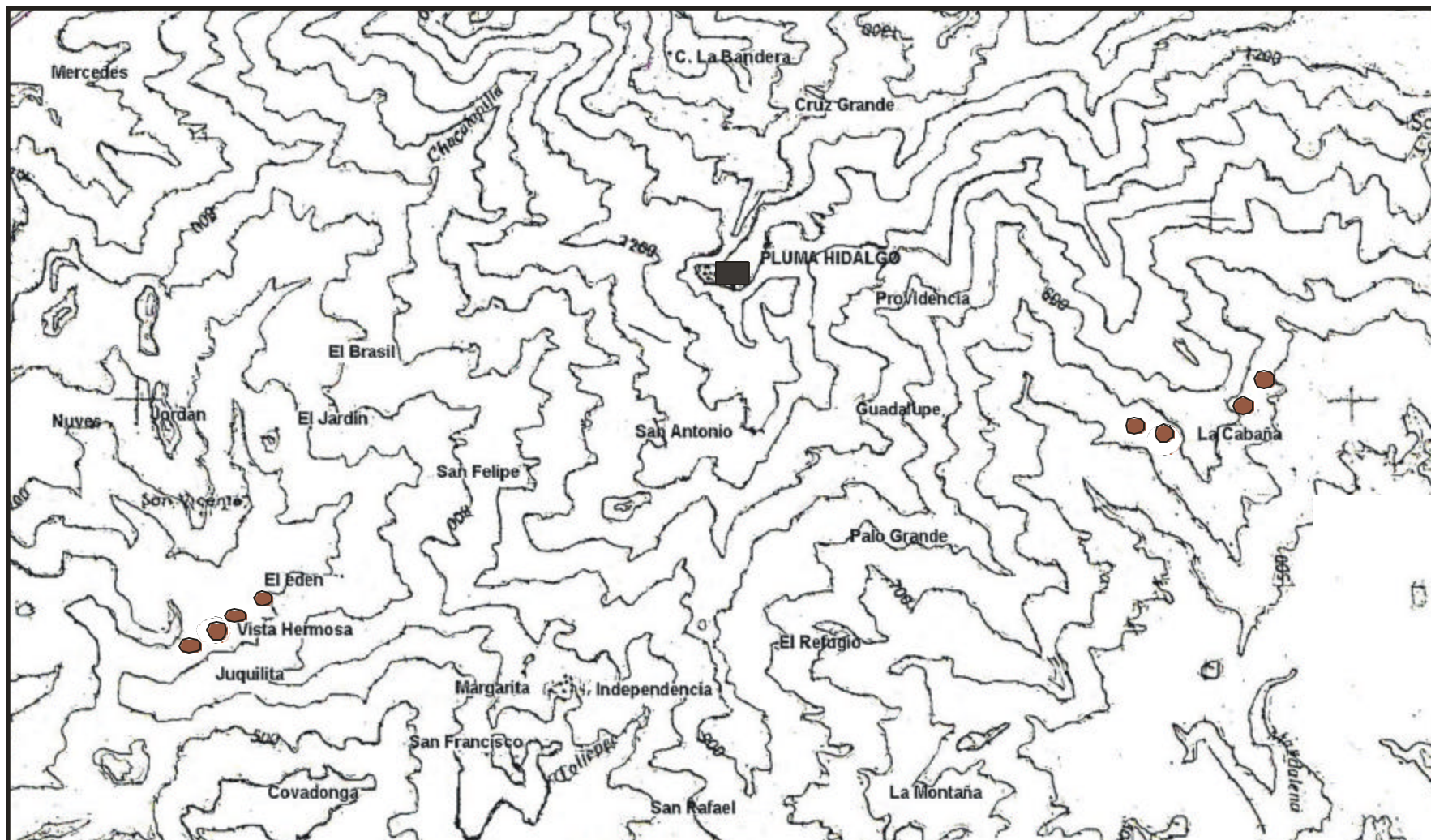
En cuanto a la posición que tienen los suelos en las laderas Krasilnikov *et al.* (2005) observan que los suelos rojos arcillosos se encuentran en el hombro de la ladera en tanto

que los suelos formados a partir de sedimentos coluviales con un moderado desarrollo se forman en el piedemonte y hombros de laderas convexas. Los Alisoles se establecen en los sitios altos ya que no son afectados por la erosión; en tanto que los suelos menos desarrollados se encuentran en laderas bajas y en el piedemonte, sobre todo en los sitios con materiales coluviales recientes. En estos sitios se forman los Umbrisoles y Cambisoles, los cuales se encuentran influenciados por deslizamientos de tierra en masa. La distribución compleja de los suelos en la zona al parecer no corresponde con los patrones de vegetación. De acuerdo con Alfaro (2004) no hay una correspondencia directa entre estos elementos del ecosistema que permitan determinar si el proceso de evolución del suelo se encuentra influenciado de manera importante por la vegetación, sino más bien por procesos geomorfológicos del pasado y del presente (García-Calderón, *et al.*, 2006).

773000

776500

780000



**Figura 2.** Localización de los sitios de estudio en el agroecosistema cafetalero de la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca. S1, S2, S3 y S4, finca la Cabaña y S5, S6, S7, S8 finca Vista Hermosa.

Aunque se ha observado que los suelos son de moderado desarrollo a desarrollados en sitios con laderas abruptas y con una importante cobertura vegetal (Krasilnikov *et al*, 2005).

La composición mineralógica de los suelos se encuentra dominada por arcillas del grupo del kaolín: kaolinitas, haloisitas deshidratadas y por gibbsita; los minerales 2:1 se encuentran representados por una mezcla de vermiculitas y micas, las cuales son escasas en los horizontes orgánicos y transicionales (Krasilnikov *et al.*, 2005; García *et al.*, 2000). La presencia de arcillas de relación 1:1 hace que los suelos sean poco fértiles por lo que tienen una fuerte dependencia de la descomposición de la materia orgánica. Este proceso de dependencia de la fertilidad por la materia orgánica es común para suelos intemperizados de zonas tropicales (Maass y García-Oliva, 1989).

El uso del suelo en la zona corresponde a una asociación de manejo agrícola, dominada como agroecosistemas cafetaleros de tipo “Jardín” cuya característica es la presencia de un estrato arbóreo, de especies autóctonas e introducidas cuya función es darle sombra al cultivo. Este se encuentra asociado a un estrato arbustivo dominado por plantas de café (Moguel y Toledo, 1996). Dentro de los cultivos asociados a los cafetales se encuentran el maíz, de autoconsumo, y plantas frutales como plátanos (*Musa* sp), naranja, mango, guanábana, para su comercialización (Ramo y Rodrigo, 1994). Las principales variedades de café que se manejan en la zona son del grupo arábico: *Coffea arabica* L. variedad *typica* Cramer y *Coffea arabica* L variedad *Mundo Novo*, las cuales se cultivan en parcelas específicas. Las especies que componen predominantemente el estrato arbóreo, del agroecosistema, son *Licania arborea*, *Manilkara zapota*, *Diospyros cumzatti*, *Enterolobium cyclocarpa*, *Pouteria mammosa*, *Bursera simaruba*, *Hymenea courbaril*, *Persea* sp., *Didymorpanax morotoni*, *Couaepia polyandria*, *Inga* sp. (Moguel y Toledo, 1996).

## CLIMATOLOGIA

Las condiciones climáticas imperantes varían de cálido subhúmedo a templado húmedo con verano cálido. De manera general esta condición corresponde a la zona costera del Pacífico, extendiéndose a lo largo de un gradiente altitudinal que va, para el cálido subhúmedo, desde el nivel del mar hasta 1000 m, y para las condiciones templadas a más de 1000 m snm. Debido a que el sitio se encuentra dentro los límites de la cordillera

costera del sur el tipo climático es  $Aw_0(w)igw''$ , de acuerdo con García (1988) corresponde al clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y con  $> 5\%$  de precipitación en invierno, con una temperatura media anual  $> 22^{\circ}\text{C}$  y la temperatura del mes más frío de  $>18^{\circ}\text{C}$ . La oscilación es de tipo isotermal de  $< 5^{\circ}\text{C}$ , con marcha tipo ganges.

La caracterización climática se llevó a cabo con la información de las estaciones climatológicas de Pluma Hidalgo (1276 msnm) y Pochutla (160 msnm) debido a que la zona de estudio se encuentra en una porción transicional entre ambas estaciones meteorológicas; es importante mencionar que los datos climáticos comprenden el periodo de 1962 a 1990. La temperatura media mensual se encuentra entre  $19.9$  a  $20.7^{\circ}\text{C}$ , siendo los meses de enero y febrero los más fríos, y abril y mayo los más cálidos. La temperatura presenta una oscilación  $< 5^{\circ}$  entre los valores mínimos y máximos. La temperatura media anual es de  $20.2^{\circ}\text{C}$ . En el caso de la estación climatológica de Pochutla reporta que la temperatura media mensual se encuentra entre  $25.3$  a  $28.0^{\circ}\text{C}$ , siendo los meses de enero y febrero los más fríos, y abril y mayo los meses más cálidos. La temperatura tiene una oscilación  $> 5^{\circ}$  entre y dentro de los valores mínimos y máximos, indicando una mayor homogeneidad climática durante el año. La temperatura media anual fué de  $26.5^{\circ}\text{C}$  en el periodo comprendido de 1961 a 1990 (Sistema Meteorológico Nacional-Comisión Nacional de Agua, 2004).

## HIDROLOGIA

En cuanto a las características hidrológicas, la zona se caracteriza por ríos jóvenes y sus cuencas son relativamente cortas donde los escurrimientos son fuertes y violentos en la época de lluvias (Alfaro, 2004). Una de las principales cuencas en la zona es la del río Copalita que se encuentra alimentada por un sistema de escurrimientos autóctonos, predominantemente superficiales, de flujo permanente. Uno de los ríos importantes y de mayor caudal es el río Magdalena, dentro de la zona de estudio. Tiene un régimen perenne y es alimentado por los escurrimientos de las zonas más altas de la cordillera de la costa sur, sobre todo de Pluma Hidalgo y San Mateo Piñas. La microcuenca del río Magdalena se encuentra orientada al noroeste y es de tipo exorréico, desembocando en el Pacífico. Otro afluente importante, en la zona de estudio, es el río Chacalapa que es alimentado por arroyos autóctonos de flujo perenne, su orientación es hacia el Pacífico (INEGI, 1997a).

## VEGETACION

La zona comparte una composición vegetal entre la selva mediana subcaducifolia (Rzedowsky, 1978) y la selva mediana subperennifolia (Torres-Colín, 2004). Las especies representativas de la selva mediana subcaducifolia tienen una altura entre 15 a 30 m dentro de las que se encuentran *Hymenaea courbaril*, *Enterolobium cyclocarpa*, *Licania arborea*, *Cynometra oaxacana*, *Bursera simaruba*, *Ceiba pentandra*, *Lonchocarpus spp.*, *Luehea candida*, *Calycophyllum candidissimum*, *Jacquinia macrocarpa*, *Pisccidia carthagenensis*, *Curatella americana* y *Bysonima crassifolia*.; además de especies, de acuerdo con Solano (1990 en Torres-Colín, 2004), con una altura mayor entre 20 a 30 m, como *Tabebuia rosea*, *Nectandra sinuata*, *Dendropanax arboreus* y *Ficus spp.* Dentro de las especies de menor talla (5 a 15 m) se encuentran *Godmania aesculifolia*, *Cochlospermum vitifolium*, *Luehea candida*, *Genipa americana*, *Spondias mombin*, *Coccoloba barbadensis*, *Trichospermum mexicanum*.

Las especies que componen la selva alta o mediana, en el estrato arbóreo de mayor talla (20 a 30 m), son: *Manilkara chicle*, *Protium copal*, *Tabebuia rosea*, *Cedrela odorata*, *Albizzia guachapele*, *Brosimum alicastrum*, *Aspioderma megalocarpa* y *Schizolobium parahyba*. Del estrato arbóreo mediano (10 a 15 m) se encuentran representadas: *Cupania dentata*, *Heliocarpus appendiculatus*, *Cordia alliflora*, *Lonchocarpus lineatus*, *Acosmium panamense*, *Castilla elastica*, *Vochysia guatemalense*. Finalmente, en el estrato arbóreo de menor tamaño (4 a 8 m) se encuentran *Tabernaemontana alba*, *Crataeva tapia*, *Pleuranthodendron lindenii*, *Exostema mexicanum*, *Astronium graveolens*, *Louteridium donnell-smithii*, *Pouteria durlandii*, *Faramea occidentalis*, *Lonchocarpus guatemalensis*, *Ficus maxima*, *Stemmadenia donnell-smithii* y *Recchia mexicana*.



## CAPITULO 3

### MATERIAL Y MÉTODO

#### 3.1 Selección de los sitios de estudio

Los sitios de estudio se eligieron a partir del análisis de materiales cartográficos y fotografías aéreas; así como mediante la corroboración de los sitios en campo. La información cartográfica se basó en el mapa geológico (INEGI, 1997a) y edafológico, escala 1:250,000 (INEGI 1888a); el mapa topográfico 1:50,000 (INEGI, 1988b). Además se hizo la revisión de las fotografías aéreas (escala 1:75,000). Los criterios de selección de los sitios considerados fueron: unidades de paisaje uniformes, la posición de la ladera, pendiente, exposición y altitud. Por lo que los sitios se establecieron en la porción superior de laderas complejas (de forma cóncava linear y convexa linear), con una inclinación entre 25 y 30°, dentro de la unidad morfológica de montaña (Schoeneberger *et al.*, 2002), característica en la Sierra Sur de Oaxaca. Los sitios se encuentran a una altitud entre 800 y 900 m snm orientados al sur-oeste, hacia la costa (Cuadro1). El material parental en los sitios de estudio se conformó por anortositas y gneiss. Otros criterios empleados fueron los macizos homogéneos de vegetación y el uso de suelo, que fue la producción de café. Posterior a esto, se hizo la corroboración de los sitios en el campo, debido a la escala de la información, donde los criterios de selección adjuntos fueron la especie y variedad de café dominante, la edad del café, manejo agrícola del cafetal de tipo jardín; así como las condiciones de apertura del dosel. Esto último se cuantificó con posterioridad mediante un análisis de fotografías hemisféricas.

En total se seleccionaron 8 sitios de estudio distribuidos en las fincas cafetaleras La Cabaña y Vista Hermosa, que se establecen dentro de la dos principales microcuencas de Pluma Hidalgo, su ubicación se muestra en la Figura 2 y sus características generales en el Cuadro 1. Los sitios consistieron de parcelas de 25 X 25 m donde se llevó acabo el

muestreo de suelos (en dos modalidades), de vegetación; mediciones de apertura del dosel y de productividad del cafetal. El método de muestreo fue aleatorio simple, mediante números al azar; para esto los sitios fueron divididos cada  $m^2$ , a los que se les asignó una coordenada.

**Cuadro 1.** Descripción de las características geográficas y topográficas de los sitios de estudio, en el agroecosistema cafetalero, dentro de la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca.

Sitios	Cuadro	Localización Geográfica	Altitud m	Pendiente (°)	Grupo de suelo
<b>Finca La Cabaña</b>					
	S1	15° 55' 20" LN 96° 24' 6" LW	894	25	Luvisol
	S2	15° 55' 20" LN 96° 24' 6" LW	866	28	Luvisol
	S3	15° 55' 33" LN 96° 23' 54" LW	835	30	Phaeozem
	S4	15° 55' 33" LN 96° 23' 54" LW	840	31	Umbrisol
<b>Finca Vista Hermosa</b>					
	S5	15° 55' 16" LN 96° 23' 54" LW	850	22	Phaeozem
	S6	15° 55' 16" LN 96° 23' 54" LW	813	25	Phaeozem
	S7	15° 55' 24" LN 96° 26' 50" LW	860	28	Umbrisol
	S8	15° 55' 24" LN 96° 26' 50" LW	890	27	Phaeozem

### **3.2 Muestreo de suelo**

El muestreo de suelos tuvo dos modalidades, que permitieron considerar la unidad del suelo y la heterogeneidad de las condiciones edáficas dentro de los sitio. En cada uno de los ocho sitios de estudio se muestreó un perfil de suelo representativo. Este se caracterizó morfológicamente, mediante la descripción de los horizontes del suelo (Schoeneberger *et al.*, 2002; Siebe *et al.*, 1996). La información se empleó para la identificar a los grupos de referencia de suelo, con base a la WRB (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Además, se tomaron 10 muestras de suelo, en cada sitio, mediante barrenaciones a una profundidad de 20 cm, considerando la presencia del horizonte orgánico.

Los parámetros determinados en campo fueron la resistividad y la humedad del suelo. Para esto último se colectaron muestras del horizonte superficial que se colocaron en envases de plástico perfectamente cerrados. Las muestras de los diferentes horizontes del suelo y de las barrenaciones (20 cm) se almacenaron, por separado, en bolsas de plástico y se registraron los datos de campo. Finalmente fueron trasladadas al laboratorio de Edafología *Nicolás Aguilera*, UNAM para su análisis. Una parte de las muestras colectadas fue trasladada al Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, España para el análisis de respiración basal del suelo.

### **3.3 Mediciones de luz disponible**

La apertura del dosel se basó en la medición de la cantidad de luz disponible en el en el piso forestal considerando la luz difusa ( $\text{mol/m}^2 \text{ día}^{-1}$ ). Esto se llevó acabo mediante fotografías hemisféricas tomadas a nivel del suelo en diez puntos dentro de cada sitio. Las fotografías hemisféricas se analizaron mediante el programa CANOPY, 1988. Este análisis consiste en cuantificar la ausencia de obstáculos en el cielo, y se calcula a partir de 160 regiones en el cielo. El análisis expresa la proporción relativa, de obstáculos ausentes, por lo que los valores son indicativos de las propiedades estructurales del dosel. El cálculo de la fracción del parche sin obstáculos puede obtenerse considerando el valor máximo de apertura en la región (Rich, 1989), donde 1 es la apertura total del dosel y 0 el valor mínimo de apertura (Ricker *et al.*, 1999).

Las fotografías fueron tomadas mediante una cámara fotográfica Pentax y una lente de ojo de pescado Sigma F (8 mm y 180° de visión); la película empleada fue en blanco y

negro modelo Kodak Tri X Pan, ASA 400. Las fotografías se realizaron con la ayuda de un tripie en posición vertical considerando cada uno los núcleos de suelo y las plantas de café, asociadas a éstos. Las exposiciones se llevaron a cabo en la época de cosecha (noviembre–diciembre). Las películas fueron reveladas en un laboratorio comercial y sólo se manejaron los negativos, que fueron montados en una tabla de luz y digitalizados con la ayuda de una cámara de video marca Canon. La imagen fue transferida a una pantalla Hitachi en blanco y negro, adaptada a una computadora donde se realizó el análisis de las fotografías mediante el programa Canopy, 1989 (Rich, 1989), este trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de comunidades del Instituto de Ecología, UNAM. Posteriormente, los datos fueron extrapolados para determinar la distribución de la apertura relativa del dosel en cada uno de los sitios mediante el programa Surfer 7.0 de Golden Software, Inc, 1999.

### **3.4 Evaluación de producción de café y colecta de especies arbóreas del agroecosistema**

La producción de café se estimó mediante la colecta de los frutos (maduros e inmaduros) de 20 plantas dentro de las parcelas (25 x 25 m) durante la época de cosecha que se establece a finales de noviembre y principios de diciembre. Las condiciones generales de las plantas de *Coffea arabica* L variedad típica fueron: un intervalo similar de edad, donde se obtiene la mayor productividad, entre los 10 a 15 años, altura aproximada de 2 m. El tipo de manejo en el cafetal fue el deshierbe con machete, ausencia de poda de los árboles de sombra y ausencia de agroquímicos, que para el caso de la finca la Cabaña le ha garantizado la certificación de producción de café orgánico de acuerdo con Ing. Pérez Mariscal (com. per).

Asociado al muestreo de café, se llevó a cabo el muestreo de las especies arbóreas cuya función es dar sombra al café, en el agroecosistema cafetalero. Todos los individuos se contabilizaron y se colectaron para su identificación taxonómica. La identificación se realizó en el MEXU, UNAM. De manera general, la determinación fue hasta familia y género y muy pocos ejemplares fueron identificados hasta especie.

### 3.5 Determinación de parámetros edáficos

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron a través de una malla de 2 mm. Las variables edáficas evaluadas fueron la Resistividad (R), humedad de suelo (H), pH relación 1:5 en H<sub>2</sub>O y KCl 1 M, carbono orgánico de suelo (COS), nitrógeno total (Nt), fósforo disponible (P<sub>disponible</sub>), potasio intercambiable (K<sup>+</sup>), calcio intercambiable (Ca<sup>2+</sup>), magnesio intercambiable (Mg<sup>2+</sup>), se llevaron a cabo en el laboratorio. Además se determinó el nitrógeno potencialmente mineralizable (N<sub>mineralizable</sub>) y la respiración de suelo (evolución de CO<sub>2</sub>-C). Este último se determinó en las muestras de suelo de la época de secas y de lluvias. A continuación se detallan las técnicas empleadas en cada análisis de acuerdo con Page (1982), van Reeuwijk (1999), Almendros *et al.* (1990) y Gianello y Bremner (1988).

La resistividad del suelo se midió con el penetrómetro de cono marca ELE y modelo LC2B. Esta determinación fue de campo y se llevó a cabo en el horizonte superficial.

La humedad del suelo (H; p/v) se evaluó mediante la técnica gravimétrica, donde se consideró la pérdida de humedad a 105° C por 16 h. La evaluación se realizó por diferencia de peso (van Reeuwijk, 1999).

El pH del suelo, relación 1:5, fue medido en una suspensión suelo: líquido de H<sub>2</sub>O y KCl 1M. El tratamiento de las muestras consistió en colocar 10 g de suelos y 50 ml de solución las cuales se mezclaron mecánicamente durante 2 hrs. La evaluación se llevó a cabo mediante un potenciómetro Corning modelo 7 con electrodo combinado de cristal (van Reeuwijk, 1999). Esta técnica fue modificada en la relación suelo:solución debido a que los suelos con un alto contenido de materia orgánica tuvieron problemas para la determinación de pH. La modificación se estandarizó en todas las muestras para su posterior comparación.

El carbono orgánico del suelo (COS; g kg<sup>-1</sup>) fue determinado por oxidación húmeda empleando el método de Walkley y Black. Esto se llevó a cabo a través de la digestión de la materia orgánica del suelo empleando como oxidante el dicromato de potasio - ácido sulfúrico concentrado y ácido fosfórico. La determinación se realizó por titulación con sulfato ferroso 0.5 N, para reducir el exceso de cromato, empleando como indicador bariosulfonato de difenil-amina (Page, 1982).

El nitrógeno total (Nt; g kg<sup>-1</sup>) se evaluó por el método de Kjeldahl que consiste en la obtención de NH<sub>4</sub>-N mediante la digestión de una muestra de suelo con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, empleando como catalizador la mezcla de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub> y selenio metálico, para aumentar la eficiencia

de la digestión. Esto se llevó a cabo en un digestor de bloques Büchi 426. La determinación del Nt se realizó en el N-NH<sub>3</sub> obtenido a partir de la destilación alcalina (NaOH 38%), en un destilador semiautomático Büchi modelo B-316. El producto destilado fue colectado en H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> al 4% y su valoración fue mediante titulación con HCl 0.1 M (Page, 1982).

La valoración del fósforo disponible ( $P_{\text{disponible}}$ ) se llevó a cabo por el procedimiento de Bray y Kurtz (1945 en Page, 1982). Este consiste en la extracción del P, rápidamente soluble en ácido, por medio de la combinación de HCl y NH<sub>4</sub>F. El P fue determinado por colorimetría, empleando el método del azul de molibdeno, molibdato de amonio y cloruro estañoso, como agente reductor. Esto fue determinado en un espectrofotómetro, Coleman modelo 35 en una longitud de onda de 640 nm de Absorbancia.

Las bases intercambiables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>) se determinaron empleando la técnica de la tiourea de plata (AgTU). Ésta se basa en la fuerte afinidad del complejo catiónico monovalente por las cargas negativas superficiales de los coloides minerales y orgánicos. La extracción se basó en la centrifugación de muestras saturadas con AgTu 0.01M, para el intercambio de bases del complejo de cambio (van Reeuwijk, 1999). Es importante mencionar que se optó por esta técnica para hacer más eficaz la extracción de las bases, ya que el método del acetato de amonio tuvo poca eficiencia en la extracción.

La medición de la concentración del calcio y magnesio intercambiables se llevó a cabo en un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 2380, en tanto que el potasio se determinó en un flamómetro de llama Corning modelo 400.

El nitrógeno orgánico potencialmente mineralizable ( $N_{\text{mineralizable}}$ ) se determinó mediante destilación por arrastre de vapor en el destilador semiautomático Büchi B-316. La producción de N-NH<sub>3</sub>, por destilación rápida en muestras de suelo, mediante la solución buffer fosfato-borato pH 11.2. La determinación se realizó titulando el NH<sub>3</sub>-N, capturado en una solución de H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub> al 2%, empleando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.005N (Gianello y Bremner, 1988).

La respiración basal del suelo (CO<sub>2</sub>-C) fue determinada en 4 muestras superficiales (20 cm), en cada uno de los sitios en dos épocas del año. La respiración fue determinada mediante la liberación de CO<sub>2</sub> en un matraz Erlenmeyer de 500 cm<sup>3</sup>. Esto se llevó a cabo en 20 g de suelo con una humedad de 60% de su capacidad de campo. Las muestras fueron incubadas a una temperatura de 23 ± 1° C, en una incubadora PRQ modelo L5. El CO<sub>2</sub> fue medido diariamente durante 21 días en un analizador de gases Carmograph-12. El

procedimiento se llevó a cabo por el desplazamiento de CO<sub>2</sub> de la atmósfera del frasco, con aire libre de CO<sub>2</sub> (Almendros *et al.*, 1990). Los datos de la respiración de suelo fueron expresados como el coeficiente de mineralización considerando el carbono total del suelo (mg C liberado por g C en 100 g de suelo), este índice da una estimación de biodegradabilidad de la materia orgánica del suelo (Giampolo *et al.*, 1996).

### **3.6 Análisis de estadísticos**

Los parámetros evaluados en esta investigación son variables continuas por lo que se procesaron a través del cálculo de la media y del error estándar, como medida de variación. Además, se realizó un análisis de normalidad para todas las variables edáficas, productividad y apertura del dosel, para cada uno de los grupos de suelo (Zar, 1999). Es importante mencionar que se hizo la transformación a log<sub>10</sub> y ln de los datos para su análisis. Los análisis estadísticos realizados fueron la comparación de medias, por unidades de suelo, de las variables edáficas, apertura relativa del dosel (ARD) y productividad. Esto se llevo a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA) donde se empleó como valor crítico  $\alpha=0.05$ . Además se aplicó el análisis de comparación múltiple de Tukey, HDS para determinar los sitios contrastantes (Zar, 1999).

La asociación de los cambios de las propiedades físicas y químicas con el cambio en apertura relativa del suelo; así como los cambios de la producción de cereza de café se llevó a cabo mediante el análisis de correlación simple del momento de Pearson para determinar la intensidad de la causa – efecto de las relaciones (Zar, 1999).

Finalmente, se realizó una prueba de hipótesis de T de dos vías para determinar la diferencia estacional de la respiración basal, en muestras de suelos superficiales, para esto se consideraron los valores acumulativos finales de la curva de respiración, para cada sitio (Zar, 1999). Los valores promedio del carbono liberado fueron obtenidos de cuatro muestras en cada sitio en las dos épocas del año. El cambio en la tasa de mineralización de la MOS se expresó a través del modelo de regresión lineal simple:

$$y=b_0x+b_1$$

La tasa de cambio del índice de mineralización se relacionó con el coeficiente parcial de regresión ( $b_0$ ) (Zar, 1999). Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa Statsoft 6.0 para Windows.

## CAPITULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1 Caracterización del agroecosistema cafetalero

La caracterización de los sitios de estudio se basa en la descripción de la composición de la vegetación, apertura relativa del dosel, manejo del cafetal, la descripción morfológica de las unidades de suelo, las características físicas y químicas del horizonte orgánico; así como las relaciones entre las propiedades del suelo y de la productividad de la cereza del café con respecto a la apertura del dosel. De acuerdo con los resultados de los análisis morfológicos y analíticos se determinaron tres grupos de suelo que fueron Phaeozems, Umbrisoles y Luvisoles de acuerdo con los criterios de la WRB (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Los Phaeozem se distribuyeron en los sitios 3, 5, 6 y 8 (S3, S5, S6 y S8), en tanto que los Umbrisoles se presentaron en los sitios 4 y 7 (S4 y S7). Finalmente, los Luvisoles se establecieron en los sitios 1 y 2 (S1 y S2). Los resultados mostraron que morfológicamente los grupos de suelo presentaron diferencias relacionadas con su evolución, expresada en la presencia de horizontes diagnósticos. El análisis de las variables edáficas del horizonte superficial (20 cm) evidenció diferencias significativas en sus propiedades físicas y químicas dentro de los diferentes grupos de suelo.

Otro atributo del agroecosistema que presentó diferencias fue en la apertura relativa del dosel (ARD). Esto sólo se estableció en los sitios sobre Phaeozems, en tanto que en los Umbrisoles y Luvisoles no se establecieron claras diferencias debido a que las condiciones son muy heterogéneas en cada sitio y hay un gradiente de condiciones de ARD. Las variaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo se asociaron con los cambios del dosel, aunque esta relación fue baja. A pesar de esto, la tendencia clara fue que los Phaeozems y Umbrisoles son suelos que tuvieron una mayor respuesta a los



cambios del dosel, en tanto que los Luvisoles tuvieron una menor respuesta a los cambios del dosel.

En cuanto a la productividad de cereza de café no presentó diferencias significativas, en cada grupo de suelos. Las variaciones en la productividad se asociaron, principalmente, con las características físicas y químicas del suelo que con la apertura relativa del dosel; además de que el cambio en la producción con respecto a la apertura depende de las unidades del suelo por lo que en el caso de los Phaeozems y Luvisoles tuvieron una mayor tendencia al aumento en la productividad con el incremento en la apertura.

A continuación se hace la caracterización de las condiciones del agroecosistema cafetalero considerando cada grupo de suelo.

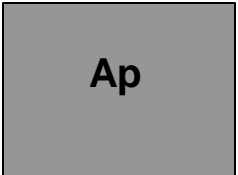
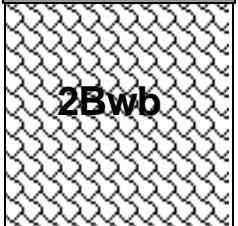
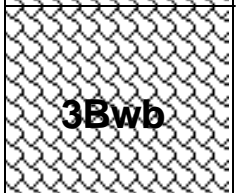

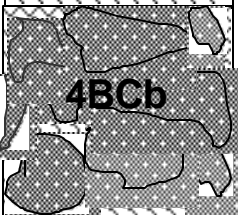
## **4.2 Descripción morfológica de las unidades de suelo en el agroecosistema cafetalero**

### **4.2.1 Caracterización de los Phaeozems**

Los suelos en los S3, S5, S6 y S8 fueron agrupados y clasificados como Phaeozems, siendo el grupo más representativo en el agroecosistema cafetalero. Los suelos presentaron diferencias morfológicas, dominadas por cambios en la secuencia de horizontes. En el caso de S5 y S8 los principales horizontes fueron Ap, AC y C, en tanto que S6 mostró un mayor grado de desarrollo, evidenciado por el mayor número de horizontes y propiedades morfológicas marcadas. Los horizontes presentes fueron el A, AB, Bw, BC y C, a pesar de la diferencia en el proceso de formación del suelo, el horizonte superficial de ambos suelos fue definido como móllico. Este se caracterizó como un horizonte muy oscuro y profundo, en el caso de los S5 y S8 tuvieron una profundidad entre 28 a 45 cm, considerando los horizontes transicionales; mientras que S3 y S6 tuvieron una profundidad del horizonte móllico entre 35 a 45 cm. Otra rasgo importante fue la presencia del horizonte Bw (cámbico), en S3 y S6. La caracterización morfológica evidenció un cambio de color, con respecto al horizonte superficial (10YR 4/3), ya que hubo un incremento tanto en la pureza como en la intensidad (10YR 5/6), en el caso del sitio 3. En el S6 la variación en el color del horizonte subsuperficial fue en la pureza (10YR 3/3 en el horizonte superficial y 10YR 4/3 horizonte subsuperficial). Además se presentó un diferencia textural entre horizontes ya que hubo un ligero incremento de la característica arcillosa en el horizonte cámbico, lo que se relacionó con un cambio en la forma y estabilidad de los agregados. De manera general, los sitios presentaron buenas condiciones de porosidad, un desarrollo radical profundo y buen drenaje. Es importante mencionar que este grupo de suelos se encontró en la porción superior de las laderas escarpadas y su distribución fue en las dos microcuencas de Pluma Hidalgo. El S3 se establece en la microcuenca del río Magdalena, en tanto que S5, S6 y S8 se establecieron en la microcuenca del río Chacalapilla. A continuación se describe la morfología del suelo, para cada uno de los sitios.

El sitio 3 se localizó en el predio La Cañería en la finca cafetalera La Cabaña en la parte superior de la ladera con una inclinación de la pendiente  $>30^\circ$ . El suelo fue profundo, bien drenado, de color pardo, marcado en apariencia, pedregoso ( $>50\%$ ). La estructura fue de moderada a débilmente desarrollada, con agregados de tamaños medios a finos. El perfil es de consistencia firme, poroso y permeable. La distribución de las raíces es

profunda (hasta los 95 cm), sobre todo de las raíces finas. El primer horizonte es muy oscuro, evidencia de la acumulación de materia orgánica, el pH es moderadamente ácido, por lo que hay una pérdida de bases. El horizonte subsuperficial es pardo amarillento y se encuentra compuesto de una secuencia de horizontes enterrados. El material parental se encontro formado de materiales muy intemperizados, predominantemente gneiss y anfibolitas.

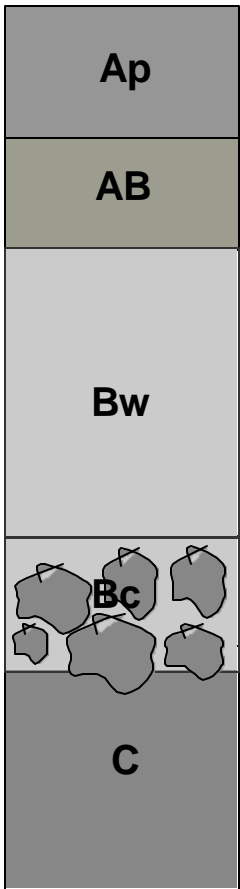
	Ap	0-35 cm	Color pardo amarillento oscuro (10YR 4/3) en húmedo, textura arena franca, consistencia ligeramente friable en húmedo. Ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, moderadamente ácido (pH 5.7 en agua), estructura granular y poliédrica subángular, pequeña y media, moderadamente desarrollada, ligeramente pedregoso (>20%) compuesta de piedras angulares, poros medianos, finos y muy finos abundantes tubulares y vesiculares dentro y fuera de los agregados, raíces medianas, finas y muy finas comunes, límite del horizonte es abrupto e irregular.
	2Bwb	35-70 cm	Color pardo amarillento (10YR 5/6) en húmedo, textura franco arcillo arenosa, consistencia ligeramente friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.1), estructura poliédrica angular de tamaño fina y media débilmente desarrollada; poco pedregoso (<10%) compuesta por gravas, piedras pequeñas y medianas angulares, poros intersticiales comunes medianos y finos, fuera de los agregados, raíces pocas medianas y finas, límite del horizonte claro y ondulado.
	3Bwb	70-95 cm	Color pardo amarillento (10YR 5/6) en húmedo, textura arena franca, consistencia ligeramente friable en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; moderadamente ácido (pH 5.3); estructura poliédrica angular fina y media débilmente desarrollada, pedregoso (50%) compuesta por gravas pequeñas, medianas y grandes angulares, poros gruesos comunes, medianos y finos pocos, fuera y dentro de los agregados, raíces medianas, finas pocas, límite del horizonte claro y ondulado.
	4Bwb	95-120 cm	Color amarillo pardusco (10YR 6/6) en húmedo, textura franca arenosa, consistencia ligeramente friable en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; moderadamente ácido (pH 5.3); estructura poliédrica angular fina y media débilmente desarrollada, ligeramente pedregoso (20-30%) compuesta por gravas pequeñas, medianas y grandes angulares, poros gruesos abundantes, medianos, finos y muy finos pocos fuera y dentro de los agregados, raíces medianas pocas, límite del horizonte claro y ondulado.
	4BCb	120-150 cm	Color amarillo pardusco (10YR 6/6) en húmedo, textura franca arenosa, consistencia ligeramente friable en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; moderadamente ácido (pH 5.4), estructura poliédrica subangular fina y media débilmente desarrollada, ligeramente pedregoso (20-30%) compuesta por gravas pequeñas, medianas y grandes angulares, poros medianos, finos comunes fuera y dentro de los agregados, raíces medianas pocas.

El sitio 5 se estableció en el predio corrida San Joaquín dentro de la finca cafetalera Vista Hermosa, en una ladera muy escarpada (inclinación >22°). El suelo fue profundo (113 cm), bien drenado, de color pardo oscuro, marcado en apariencia, ligeramente pedregoso (>5%); agregados de tamaño medio a fino de débil desarrollo, es firme, poroso y permeable. La distribución de las raíces fue profunda (hasta los 113 cm), sobre todo de las raíces finas y muy finas. El primer horizonte se caracterizó como oscuro, lo que evidencia la acumulación de materia orgánica, el pH fue moderadamente ácido debido a una ligera pérdida de bases. El material parental estuvo conformado por materiales muy intemperizados, predominantemente de anortositas.

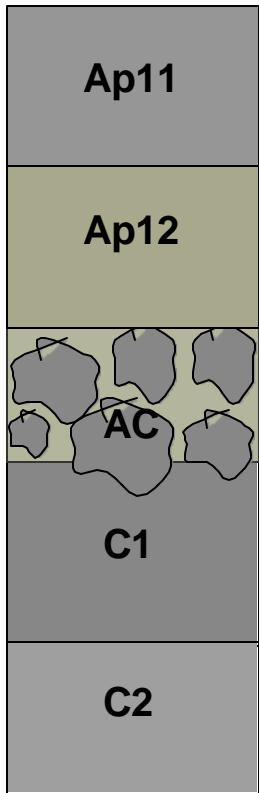
<b>Ap11</b>	Ap11 0-24 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franco arenosa, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.3 en agua), estructura granular, media, débilmente desarrollada; muy poca pedregosidad (2%) compuesta de gravas angulares, poros micro, muy finos, finos y medios abundantes vesiculares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, medias escasas, límite del horizonte abrupto y ondulado.
<b>Ap12</b>	Ap12 24-35/45 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franco arenosa, consistencia firme en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.0 en agua), estructura granular y poliédrica subangular, fina a media, débilmente desarrollada; muy poca pedregosidad (2%) compuesta por gravas angulares, poros abundantes micro, muy finos, finos y medios vesiculares dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, medias y gruesas escasas, límite del horizonte abrupto y quebrado.
<b>C1</b>	C 35/45-113 cm	Color pardo amarillento oscuro (10YR 5/4) en húmedo, textura arena franca, consistencia muy friable en húmedo no adhesivo, no plástico, moderadamente ácido (pH 5.8 en agua), estructura granular grande y poliédrica subangular fina débilmente desarrollada, poros tubulares finos y medios abundantes dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas comunes, medianas escasas.

El sitio 6 se estableció en el predio San Joaquín dentro de la finca Vista Hermosa, sobre una ladera escarpada con una inclinación de 25°. El suelo fue profundo (>85 cm), bien drenado, de color pardo, marcado en apariencia, ligeramente pedregoso (±25%). La estructura tuvo un desarrollo de moderada a débil, con agregados de tamaño medio a fino,

el perfil fue firme, poroso y permeable. La distribución de las raíces fue profunda (hasta los 88 cm), sobre todo de las raíces finas. El material parental se encontró conformado de materiales muy intemperizados, predominantemente de anortositas. Los primeros horizontes evidenciaron una importante acumulación de materia orgánica por lo presentaron una coloración oscura, el pH fue moderadamente ácido, sobre todo el horizonte móllico y ligeramente ácido el horizonte subsuperficial debido a una ligera pérdida de bases. El horizonte B tuvo textura arenosa o más fina que la capa que le subyace, probablemente por la formación de arcillas *in situ* y ligera iluviación ya que se presentaron ligeros recubrimientos de arcillas y ferriargilanes quebrados y delgados en la cara de los agregados.

	Ap	0-15 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franco arenosa, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, ligeramente ácido (pH 6.0 en agua), estructura granular, moderada, media a grande; ligeramente pedregosa (20%) compuesta de gravas y piedras pequeñas angulares, poros abundantes muy finos, finos y medianos, vesiculares e intersticiales dentro y entre los agregados, raíces finas y muy finas muy abundantes, gruesas abundantes, límite del horizonte abrupto y ondulado.
	AB	15-35 cm	Color pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo, textura franco, consistencia firme en húmedo, ligeramente adhesivo ligeramente plástico, nódulos de hierro muy pocos, moderadamente ácido (pH 5.9 en agua), estructura granular media moderadamente desarrollada; ligeramente pedregosa (20%) compuesta por gravas y piedras pequeñas y medianas angulares, poros comunes finos y medianos vesiculares e intersticiales dentro y entre los agregados, raíces finas y muy finas comunes, medias escasas, límite del horizonte claro y horizontal.
	Bw	35-52 cm	Color pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo, textura franco arcillo arenoso, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, recubrimientos de arcillas delgados, quebrados, pocos y ferriargilanes pocos, ligeramente ácido (pH 6.2 en agua), estructura poliédrica subangular y granular media y fina, moderadamente desarrollada, ligeramente pedregosa (20%) compuesta por gravas y piedras, pequeñas y medianas angulares, poros comunes, tubulares medianos fuera de los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, medianas escasas, límite del horizonte claro y horizontal.
	BC	52-88 cm	Color pardo oscuro (10YR 4/3) asociado a rojo (7.5YR 4/8) en húmedo, textura franco arcillo arenoso, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; ligeramente ácido (pH 6.3 en agua), estructura poliédrica subangular media y fina débilmente desarrollada, pedregosidad de 60% compuesta por piedras grandes muy grandes medianas y pequeñas de forma angular, poros comunes micro, finos y muy finos tubulares e intersticiales dentro y entre los agregados, raíces medias presentes y finas escasas, límite del horizonte claro y horizontal.
	C	> 88 cm	Color pardo fuerte (10YR 5/6) en húmedo, textura arcillo arenosa, ligeramente ácido (pH 6.3 en agua).

El sitio 8 se localizó en el predio San Joaquín, finca Vista Hermosa sobre una ladera escarpada (inclinación 27°). El suelo fue profundo (94 cm), presentó un color pardo oscuro, ligeramente marcado en apariencia, moderadamente ácido, debido a una ligera pérdida de bases, ligeramente pedregoso ( $\pm 25\%$ ). El desarrollo de la estructura fue de moderada a débil, con agregados de tamaño medio a finos. El perfil presentó una consistencia firme a friable, poroso y permeable. Las raíces tuvieron una distribución hasta los 58 cm, sobre todo de las raíces finas. El material parental fue anortosita fuertemente intemperizada.

	Ap11	0-10 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.5 en agua), estructura granular, media a grande moderadamente desarrollada; poco pedregosa (20%) compuesta de gravas pequeñas subangulares, poros tubulares e intersticiales abundantes finos y muy finos, dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, medias comunes y gruesas escasas, límite del horizonte claro y ondulado.
	Ap12	10-20 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.4 en agua), estructura granular, media a grande moderadamente desarrollada; poco pedregoso (20%) compuesta por gravas medianas subangulares, poros tubulares e intersticiales, abundantes, micro, finos, muy finos y medios dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, medias comunes y gruesas escasas, límite del horizonte abrupto y quebrado.
	AC	20-28 cm	Color pardo amarillento oscuro (10YR 4/2) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia friable en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.4 en agua), estructura granular grande y poliédrica subangular fina débilmente desarrollada, poros tubulares finos y medios abundantes dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas comunes, medianas escasas, límite del horizonte abrupto y quebrado.
	C1	28-58 cm	Color pardo amarillento (10YR 6/6) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia friable en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; moderadamente ácido (pH 5.5 en agua), estructura poliédrica subangular y granular fina débilmente desarrollada, poros tubulares finos comunes dentro y fuera de los agregados, raíces finas presentes y medias comunes, límite del horizonte difuso y ondulado.
	C2	58-94 cm	Color pardo amarillento muy pálido (10YR 7/4) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia muy friable, ligeramente adhesiva, ligeramente plástica moderadamente ácido (pH 6.3 en agua), moderadamente pedregoso compuesta por gravas medias angulares y subangulares.

#### 4.2.2 Caracterización de los Umbrisoles

Los suelos en S4 y S7 se determinaron como Umbrisoles y se ubicaron en las fincas la Cabaña y Vista Hermosa. La caracterización de los perfiles del suelo evidenció diferencias morfológicas relacionadas con la secuencia de horizontes. En el caso de S7, el suelo se conformó de los horizontes Ap11, Ap12, AC, C1 y C2, en tanto que S4 presentó un mayor grado de desarrollo, evidenciado por el mayor número de horizontes dentro de los que se encontraron los horizontes A, AB, Bw, BC, C1 y C2. A pesar de la diferencia en el proceso de formación, el horizonte superficial se diagnosticó como un epipedón úmbrico. Las características más importantes del epipedón fue el color oscuro, su espesor, entre 20 a 53 cm considerando los horizontes transicionales; así como la saturación de bases menor a 50%. Otra rasgo importante es la presencia del horizonte Bw, sólo en el sitio 4, lo que le confiere un mayor grado de desarrollo. Este horizonte de diagnóstico se caracterizó por el cambio en el color, debido al aumento en la intensidad con respecto al horizonte superficial (10YR 3/2 a 10YR 3/3). También presentó un cambio textural ligeramente más arcilloso y un cambio de forma y mayor estabilidad a los agregados. Este grupo de suelos se estableció en la microcuenca del río Magdalena y del río Chacalapilla, en la porción superior de una ladera abrupta. A continuación se hace la descripción morfológica del suelo para cada uno de los sitios.

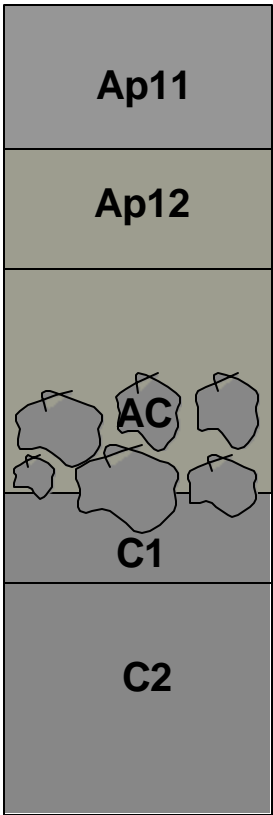
El sitio 4 se estableció en el predio Palo Piedra en la finca La Cabaña en una ladera muy escarpada (inclinación  $>31^{\circ}$ ). El suelo se caracterizó por ser profundo, bien drenado, permeable, de color pardo oscuro, claro en apariencia, ligeramente pedregoso ( $>20\%$ ). La estructura tuvo un tamaño de medio a fino con un desarrollo de moderado a débil, firme en consistencia, porosos predominantemente poros pequeños. La distribución de las raíces es profunda, sobre todo de las raíces finas (95 cm). El horizonte superficial fue oscuro evidencia de la acumulación de materia orgánica, el pH es ligeramente ácido, por lo que la pérdida de bases es poca. El material parental se encuentra formado de materiales muy intemperizados, predominantemente de anortositas.

<b>Ap</b>	Ap	0-10 cm	Color pardo amarillento oscuro (10YR 2/2) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, plástico, ligeramente ácido (pH 6.3 en agua), estructura granular y poliédrica subangular, moderada, media a fina; ligeramente pedregoso (20%) compuesto de gravas y piedras pequeñas angulares, poros finos, muy finos y medianos abundantes intersticiales, tubulares y vesiculares dentro y fuera de los agregados, raíces medias, finas y muy finas abundantes y gruesa comunes, límite del horizonte claro y ondulado.
<b>AB</b>	AB	10-30 cm	Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo, adhesivo, plástico, ligeramente ácido (pH 6.4), estructura poliédrica subangular media, fina y grande moderadamente desarrollada; ligeramente pedregoso (20%) compuesto por gravas angulares, poros finos y medios vesiculares y tubulares abundantes, dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas comunes, medias escasas, límite del horizonte claro y horizontal.
<b>Bw</b>	Bw	30-70 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia firme en húmedo adhesivo, plástico con cutanes quebrados delgados; ligeramente ácido (pH 6.4), estructura poliédrica subangular media, fina y grande, débilmente desarrollada, moderadamente pedregoso (50%) compuesto por gravas y piedras pequeñas, medianas y grandes angulares, poros finos, medios comunes tubulares fuera de los agregados, raíces finas y muy finas comunes, límite del horizonte claro y horizontal.
<b>BC</b>	BC	70-95 cm	Color pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, textura arena arcillosa, consistencia friable, ligeramente adhesiva, ligeramente plástico; ligeramente ácido (pH 6.5), estructura poliédrica subangular media y grande débilmente desarrollada, pedregoso (60%) compuesto por gravas, piedras pequeñas medianas y grandes angulares, poros tubulares finos y medianos escasos dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas presentes límite del horizonte abrupto horizontal.
<b>C1</b>	C1	95-102 cm	Color pardo oscuro (7.5YR 4/3) asociado a amarillo (10YR 7/6) en húmedo, textura arena franca, consistencia friable, muy poco adhesivo, muy poco plástico; muy ligeramente ácido (pH 6.6), estructura poliédrica subangular mediana a grande débilmente desarrollada poco pedregoso (15%) compuesto por gravas piedras pequeñas angulares, poros finos escasos vesiculares entre los agregados, raíces finas presentes, medianas escasas, límite del horizonte abrupto y horizontal.
<b>C2</b>	C2	102-133 cm	Color amarillo pardusco (10YR 4/3) asociado a 10YR 7/6 en húmedo, saprolita, muy ligeramente ácido (pH 6.6).

El sitio 7 se localiza en el predio Los Pocitos dentro de la finca Vista Hermosa, en una ladera escarpada (inclinación 28°). El suelo es profundo, bien drenado, de color pardo, marcado los límites de los horizontes, poco pedregoso (5%). La estructura fue moderada a débil, con agregados de tamaños medios a finos, el perfil fue firme a friable, ligeramente ácido, poroso, dominado por poros finos y muy finos, permeable. La distribución de las raíces fue profunda sobre todo de las raíces finas. El material parental se encuentra formado de materiales muy intemperizados, predominantemente anortositas.



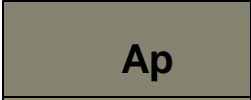

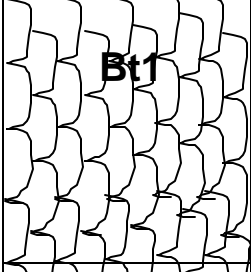
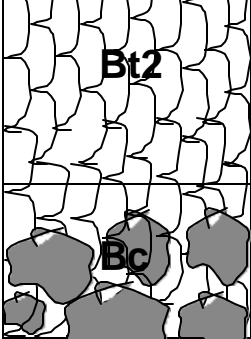
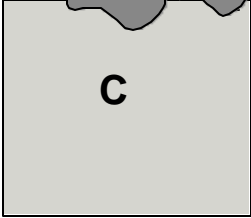

Los primeros horizontes evidencian acumulación de materia orgánica, con una ligera disminución de bases debido a la ligera acidez del suelo.

	Ap11	0-13 cm	Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, ligeramente ácido (pH 6.4 en agua), estructura granular, grumosa y media, moderadamente desarrollada; poco pedregosa (5%) compuesta de gravas pequeñas subangulares, poros abundantes micro, finos y muy finos tubulares e intersticiales dentro y entre los agregados, raíces finas y muy finas abundantes, finas y medias abundantes, gruesas escasas, límite del horizonte abrupto y quebrado.
	Ap12	13-37 cm	Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo, textura franca, consistencia firme en húmedo, ligeramente adhesivo ligeramente plástico, ligeramente ácido (pH 6.4 en agua), estructura granular y grumosa media moderadamente desarrollada; escasamente pedregosa (5%) compuesta por gravas finas subangulares, poros abundantes micro, finos muy finos y medios tubulares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas muy abundantes medias comunes gruesas y muy gruesas escasas, límite del horizonte claro y ondulado.
	AC	37-50 cm	Color pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo, textura franca, consistencia friable en húmedo ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, ligeramente ácido (pH 6.6 en agua), estructura granular y poliédrica subangular media y fina, débilmente desarrollada, escasamente pedregosa (2%) compuesta por gravas y piedras medianas subangulares, poros abundantes muy finos, finos y medios tubulares dentro y fuera de los agregados, raíces muy finas y finas comunes, límite del horizonte abrupto y quebrado.
	C1	50-77 cm	Color amarillento pardusco (10YR6/6) en húmedo, textura franca arenosa, consistencia muy friable en húmedo no adhesivo, no plástico; ligeramente ácido (pH 6.5 en agua), estructura poliédrica subangular fina y media débilmente desarrollada; ligeramente pedregosa (30%) compuesta por piedras medianas, subangular; poros abundantes finos y medios intersticiales fuera de los agregados, raíces finas comunes, límite del horizonte abrupto y ondulado.
	C2	77-100 cm	Color amarillo pálido (10YR 6/6) en húmedo, textura franca arenosa, consistencia muy friable húmedo no adhesivo, no plástico; ligeramente ácido (pH 6.5 en agua) pedregosa (60%) compuesta por piedras grandes y medianas angulares, poros comunes finos y muy finos intersticiales.

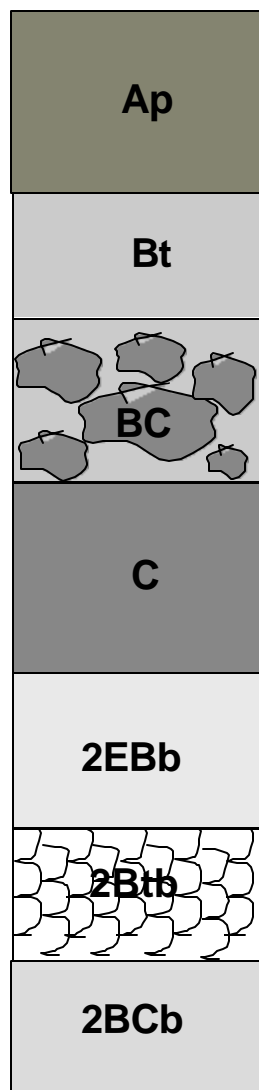
### 4.2.3 Caracterización morfológica de los Luvisoles

Los suelos descritos en S1 y S2 fueron los más evolucionados debido a la presencia de características morfológicas marcadas debido a esto fueron determinados como Luvisoles. Estos suelos presentaron un horizonte diagnóstico ócrico que se caracterizó como un horizonte superficial moderadamente oscuro y profundo. Asociado se determinó al horizonte de diagnóstico árgico, horizonte Bt. Estos suelos se distribuyeron en el agroecosistema cafetalero de la finca la cabaña. La secuencia de horizontes caracterizada para estos suelos fue de Ap11 (AB), Bt (BC) y C, para S1, en tanto que S2 presentó mayor complejidad ya que los horizontes fueron Ap11, Bw (BC), C, 2EBb, 2Bt, 2BCb, relacionados con una formación policíclica, ya que se evidenció una secuencia de suelos enterrados, claramente definidos sobre todo en S2 y no evidentes en el S1; a pesar de estas diferencias en formación comparten un número importante de características morfológicas y químicas que los engloba en la misma unidad de suelo. Dentro de las evidencias de mayor desarrollo de estos suelos es su estructura, mayor contenido de arcillas en los horizontes B así como la presencia de recubrimientos de arcillas por el movimiento de estas partículas del suelo. Un rasgo importante es la profundidad del horizonte superficial (considerado los horizontes transicionales), en el caso de S1 alcanzó 29 cm, en el tanto que para S2 fue de 20 cm. A continuación se hace la descripción morfológica del suelo para cada uno de los sitios.

El sitio 1 se estableció en el predio la cañería de la finca La Cabaña que se encuentra dentro de la microcuenca del río Magdalena. El sitio se ubicó en la porción media en una ladera compleja muy escarpada (inclinación 28°). El suelo fue profundo, bien drenado, de color pardo oscuro, claro en apariencia, ya que los límites entre los horizontes son marcados; ligeramente pedregoso (>20%) compuesto de gravas y piedras pequeñas. La estructura fue de moderada a débil, con agregados de tamaño medios a finos, el perfil es firme, permeable, poroso predominantemente pequeños. La distribución de las raíces es profunda, sobre todo de las raíces finas. El primer horizonte es ligeramente oscuro, el pH es moderadamente ácido. El material parental se encuentra formado de materiales muy intemperizados predominantemente de anortositas.

	Ap	0-9/12 cm	Color pardo oscuro (7.5YR 4/4) en húmedo, textura franca, consistencia firme ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.2 en agua), estructura granular, media moderadamente desarrollada; ligeramente pedregoso (10%) compuesta de gravas, guijarros, piedras pequeñas medias y grandes angulares, poros abundantes medianos y finos vesiculares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas abundantes, medias comunes y delgadas abundantes, limite del horizonte claro y ondulado.
	AB	9/12-29 cm	Color pardo fuerte (5YR5/6) en húmedo, textura franco arcilloso, consistencia en firme en húmedo, ligeramente adhesivo ligeramente plástico, moderadamente ácido (pH 5.1), estructura poliédrica subangular de tamaño media y grande moderadamente desarrollada; ligeramente pedregoso (10%) compuesta por gravas, guijarros piedras pequeñas, medianas y grandes angulares, poros tubulares medianos y finos muy abundantes vesiculares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas abundantes, medias pocas, límite del horizonte difuso y ondulado.
	Bt1	29-68 cm	Color pardo fuerte (5YR 4/6) en húmedo, textura franco arcillo, consistencia firme en húmedo muy adhesivo, muy plástico, argilanes comunes finos y medios, entre los agregados y en los poros; ligeramente ácido (pH 5.2), estructura poliédrica subangular media y grande moderadamente desarrollada, ligeramente pedregoso (10%) compuesta por gravas, guijarros, piedras pequeñas medianas y grandes angulares, subangulares y laminares, poros medianos frecuentes vesiculares, tubulares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas abundantes, medias pocas, límite del horizonte abrupto y quebrado.
	Bt2	68-92 cm	Color pardo fuerte (5YR4/6) en húmedo, textura arcillosa, consistencia en firme en húmedo, muy adhesivo y muy plástico, argilanes abundantes medios entre los agregados y en poros, moderadamente ácido (pH 5.1), estructura poliédrica subangular y angulares grande moderadamente desarrollada, ligeramente pedregoso (10%) compuesto de gravas, guijarros y piedras, pequeñas, medias y grandes angulares, subangulares y laminares; poros medianos frecuentes vesiculares, tubulares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas comunes, medias pocas.
	BC	82-103 cm	Color amarillo rojizo (7.5YR7/6) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia firme en húmedo plástico y adhesivo, fuertemente ácido (pH 4.9), estructura poliédrica subangular pequeña débilmente desarrollada, pedregoso (50%) compuesto por gravas, guijarros y piedras pequeñas, medianas y grandes angulares, subangulares y laminares; raíces finas y muy finas comunes medias pocas, limite del horizonte marcado ondulado.
	C	>103 cm	Color amarillo rojizo (5YR6/8) en húmedo, textura franco arcilloso, consistencia firme en húmedo plástico y adhesivo, moderadamente ácido (pH 5.6), pedregoso (50%) compuesto por gravas, guijarros, piedras pequeñas medianas y grandes, poros medianos comunes tubulares fuera y dentro de los agregados, raíces finas y medias raras.

Ap11



Color pardo amarillento oscuro (7.5 3/3) en húmedo, textura franco arcilloso, consistencia firme en húmedo, adhesiva, ligeramente plástica, moderadamente ácido (pH 5.4 en agua), estructura granular fina y en bloques subangulares medios moderadamente desarrollada; poco pedregoso (2%) compuesta de piedras fina medianas y grandes angulares; presencia de cutanes arcillosos en los poros, poros finos abundantes vesiculares dentro y fuera de los agregados, raíces finas, muy fina y medias abundantes, límite del horizonte claro y ondulado.

Bw 20-30 cm Color pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia en firme en húmedo, adhesivo, plástico, moderadamente ácido (pH 5.4), estructura poliédrica subangular y angular media moderadamente desarrollada; muy poco pedregoso (10%) compuesta por piedras y gravas pequeñas, medianas y grandes angulares; cutanes delgados comunes sobre los agregados y los hoyos; poros finos abundantes tubulares dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas muy poco comunes, medias y gruesas raras, límite del horizonte gradual y ondulado.

BC 30-40 cm Color pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo, textura franco arcillosa, consistencia firme en húmedo plástico, adhesivo; ligeramente ácido (pH 5.3), estructura poliédrica subangular medios moderadamente desarrollada, poco pedregoso (10%) compuesto por gravas y piedras finas, medianas y grandes angulares, algunos recubrimientos de arcillas en los poros, poros muy finos y finos, y medios abundantes tubulares dentro y fuera de los agregados, raíces finas y muy finas pocas y medias raras, límite del horizonte claro y irregular.

C 40-65 cm Color rojo amarillento (5YR5/6) en húmedo, textura franco areno-arcillosa, consistencia firme en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, moderadamente ácido (pH 5.3), estructura poliédrica angular y subangular media y moderadamente desarrollada, moderadamente pedregoso (20%) compuesto por piedras y gravas finas, medianas y grandes subangulares, muy pocos recubrimientos de arcillas en poros, poros abundantes finos y medianos escasos tubulares e intersticiales dentro y fuera de los agregados, raíces medias y finas pocas, limite de los horizontes claro y ondulado.

2EBb 65-85 cm Color amarillo rojizo (5YR5/6) con motas rojas (2.5YR5/8) en húmedo, franco arenosa, consistencia ligeramente friable húmedo ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, moderadamente ácido (pH 5.3); estructura prismática y poliédrica angular mediana, moderada a fuertemente desarrollada, poco pedregoso (10%), muy pocos recubrimientos de arcillas sobre la superficie de los agregados, poros finos comunes intersticiales, solo raíces medias, limite del horizonte claro irregular.

2Btb 85-165 cm Color rojo (2.5YR5/6) en húmedo, textura arcillosa, consistencia muy firme en húmedo, muy plástico, muy adhesivo, estructura prismática grande fuertemente desarrollada, ligeramente pedregoso (10%), muchos recubrimientos de arcillas en los poros y comunes sobre los agregados, moderadamente ácido (pH 5.3), poros finos comunes intersticiales, limite del horizonte gradual y ondulado.

2BCb 110-145 cm Color rojo en húmedo (2.5YR4/8) con motas amarillo rojizo (5YR7/8), textura franco arena arcillosa, consistencia firme en húmedo ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, estructura poliédrica subangular y prismática mediana fuertemente desarrollada, cutanes en los poros y sobre los agregados, moderadamente ácido (pH 5.3).

El sitio 2 se estableció en el predio la cañería de la finca La Cabaña, dentro la microcuenca del río Magdalena. El sitio se ubicó en la porción media de una ladera convexa muy escarpada (inclinación 25°). El suelo es profundo, bien drenado, de color pardo oscuro a rojizo, claro en apariencia, ligeramente pedregoso (10%) compuesto por gravas y piedras pequeñas. La estructura fue fuerte, con agregados de tamaño medio a grande, el perfil es firme, permeable con poros pequeños. La distribución de las raíces fue profunda, sobre todo de las raíces finas. El primer horizonte ligeramente oscuro evidencia de poca acumulación de materia orgánica, el pH es moderadamente ácido, por una ligera pérdida de bases. El material parental se encuentra formado de materiales muy intemperizados predominantemente de Anortositas.

### 4.3 Caracterización física y química del suelo en el agroecosistema cafetalero

El análisis de las propiedades físicas y químicas en el horizonte superficial de los Phaeozems, Umbrisoles y Luvisoles mostró variaciones en las condiciones físicas y químicas en cada grupo de suelos. El grupo que presentó el mayor número de diferencias en sus propiedades físicas y químicas fueron los Phaeozem (Cuadro 2), posteriormente los suelos determinados como Umbrisoles (Cuadro 4) y, finalmente, el grupo con menor variación fueron los Luvisoles (Cuadro 6). A continuación se describen de manera detallada el análisis de comparación de las variables edáficas para cada grupo de suelos.

En el Cuadro 2 se muestra el análisis de comparación múltiple de medias de los Phaeozems. Para el caso de las propiedades físicas hubo diferencias significativas en la humedad y resistividad entre los sitios. En el caso de la humedad, las diferencias en los valores promedio se establecieron entre S3 y S6 de S5 y S8. Los sitios 3 y 6 tuvieron los valores promedio más bajos (15.8 y 21.7 p:v), con respecto al resto de los sitios. En el caso de la resistividad las condiciones fueron más heterogéneas entre los sitios ya que se diferenciaron S3, S5 y S8, en tanto que S6 sólo se diferenció con S3. En este caso el valor promedio más bajo se estableció en S3 ( $27.5 \text{ g kg}^{-1}$ ) y el valor promedio más alto se presentó en S8 ( $99.6 \text{ g kg}^{-1}$ ). En general, el S3 tuvo la menor resistividad y menor humedad, en tanto que el S8 tuvo los valores promedio más altos de resistividad y humedad. Es importante mencionar que en el caso del S6 fue el suelo con mayor desarrollo y que presentó un valor promedio intermedio de humedad y un valor promedio de resistividad alto (Cuadro 3).

En cuanto a las propiedades químicas los sitios presentaron condiciones heterogéneas ya que se presentaron diferencias significativas en la mayoría de las variables evaluadas, exceptuando COS,  $N_{\text{mineralizable}}$ ,  $P_{\text{disponible}}$  (Cuadro 2). Los sitios que presentaron el mayor número de diferencias entre las variables fueron S3 y S8, en tanto que S5 y S6 tuvieron pocas diferencias significativas ( $p < 0.05$ ; Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial de Phaeozems, en cuatro sitios dentro de un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio son de 10 muestras de suelo por sitio. Los valores significativos se encuentran en negritas.

Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	P
Resistividad ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Sitio	30042.37	3	10014.1	<b>22.58</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	15963.92	36	443.4		
Humedad (p:v)	sitio	1681.78	3	560.5	<b>13.42</b>	<b>&lt;0.05</b>
	error	1502.98	36	41.7		
pH $\text{H}_2\text{O}$	sitio	5.07	3	1.6	<b>25.39</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	2.39	36	0.06		
pH KCl	sitio	1.35	3	0.45	<b>9.86</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	1.64	36	0.04		
*COS ( $\text{g kg}^{-1}$ )	sitio	9.73	3	3.2	2.34	0.09
	error	38.71	28	1.3		
Nt ( $\text{g kg}^{-1}$ )	sitio	1.39	3	0.46	<b>5.79</b>	<b>0.002</b>
	error	2.89	36	0.08		
C/N	sitio	395.93	3	444.0	<b>14.46</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	328.51	36	131.9		
N <sub>mineralizable</sub> ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	sitio	0.25	2	0.12	1.52	0.23
	error	1.99	24	0.08		
*P <sub>disponible</sub> ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	sitio	9.73	3	3.2	2.34	0.09
	error	38.71	28	1.3		
K <sup>+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	0.40	3	0.13	<b>9.30</b>	<b>&lt;0.05</b>
	error	0.52	36	0.01		
Ca <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	238.09	3	79.3	<b>43.56</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	65.57	36	1.8		
Mg <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	26.37	3	8.7	<b>39.19</b>	<b>&lt; 0.05</b>
	error	8.07	36	0.22		

Datos transformados a \*ln y \*\* log<sub>10</sub>

Los sitios de estudio presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en sus valores promedio de pH en agua (Cuadro 2). Para estos suelos la tendencia fue de dos condiciones de pH: 1) moderadamente ácido, donde S8 tuvo el valor promedio más bajo (5.1), y 2) ligeramente ácido, donde S3 tuvo el valor promedio más alto de pH (6.0). Las condiciones ligeramente ácidas dominaron en los sitios de estudio (S3, S5 y S6). Es importante mencionar que para la reacción ligeramente ácida se presentaron diferencias significativas entre los valores promedio de S3 y S5. Esta condición entre los dos sitios no pudo diferenciarse en la escala debido a que no se consideran dentro del proceso de acidez del suelo pequeñas variaciones de pH (Siebe *et al.*, 1996; Cuadro 3).

En el caso de la acidez potencial se mantuvo la misma tendencia, el S3 tuvo el valor más alto de pH (4.6) y el S8 tuvo el valor más bajo (pH 4.1) por lo que S5 y S6 se mantienen con valores intermedios (pH 4.3). Un punto importante que hay que mencionar es que el S6 presentó mayor diferencia entre el pH real y potencial (1.4) que el resto de los sitios, donde la diferencia fue una unidad (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Características físicas y químicas del horizonte superficial de Phaeozems un agroecosistema cafetalero, en la comunidad de Pluma Hidalgo. Los valores promedios son de 10 muestras de suelo. Los números entre paréntesis representan el error estándar y los supraíndices señalan las diferencias significativas entre sitios ( $p < 0.05$ ).

Sitio de estudio	H p.v	R g kg <sup>-1</sup>	pH 1:5		COS g kg <sup>-1</sup>	Nt g kg <sup>-1</sup>	C/N	N <sub>mineralizable</sub> μg g <sup>-1</sup>	P <sub>disponible</sub> mg kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> cmol(+) kg <sup>-1</sup>
			H <sub>2</sub> O	KCl								
<b>Palo Piedra, La Cabaña</b>												
S3	15.8 <sup>a</sup> (2.3)	27.5 <sup>a</sup> (2.6)	6.0 <sup>a</sup> (0.07)	4.6 <sup>a</sup> (0.08)	22.7 <sup>a</sup> (2.8)	1.9 <sup>a</sup> (0.07)	11.6 <sup>a</sup> (1.3)	91 <sup>a</sup> (0.01)	722.3 <sup>a</sup> (137.1)	0.19 <sup>a</sup> (0.02)	11.2 <sup>a</sup> (0.5)	3.1 <sup>a</sup> (0.2)
<b>San Joaquín, Vista Hermosa</b>												
S5	30.8 <sup>b</sup> (0.63)	75.5 <sup>c</sup> (7.9)	5.6 <sup>c</sup> (0.06)	4.3 <sup>ab</sup> (0.04)	24.7 <sup>a</sup> (0.5)	1.78 <sup>ab</sup> (0.07)	14.2 <sup>a</sup> (0.37)	82 <sup>a</sup> (0.01)	176.6 <sup>a</sup> (15.4)	0.44 <sup>b</sup> (0.04)	6.04 <sup>bc</sup> (0.4)	2.1 <sup>b</sup> (0.1)
<b>San Joaquín, Vista Hermosa</b>												
S6	21.7 <sup>a</sup> (2.8)	88.1 <sup>bc</sup> (8.2)	5.9 <sup>ac</sup> (0.08)	4.3 <sup>b</sup> (0.07)	23.1 <sup>a</sup> (0.8)	1.6 <sup>b</sup> (0.08)	14.5 <sup>a</sup> (0.6)	68 <sup>a</sup> (0.01)	202.2 <sup>a</sup> (19.3)	0.28 <sup>a</sup> (0.02)	6.4 <sup>b</sup> (0.3)	2.3 <sup>b</sup> (0.1)
<b>Los Pocitos, Vista Hermosa</b>												
S8	30.5 <sup>b</sup> (1.4)	99.6 <sup>b</sup> (6.5)	5.1 <sup>b</sup> (0.1)	4.1 <sup>c</sup> (0.06)	29.7 <sup>a</sup> (2.1)	1.4 <sup>b</sup> <sup>c</sup> (0.10)	20.3 <sup>b</sup> (1.02)	nd	3499 <sup>a</sup> (112.4)	0.28 <sup>a</sup> (0.04)	4.8 <sup>c</sup> (0.3)	0.89 <sup>c</sup> (0.1)

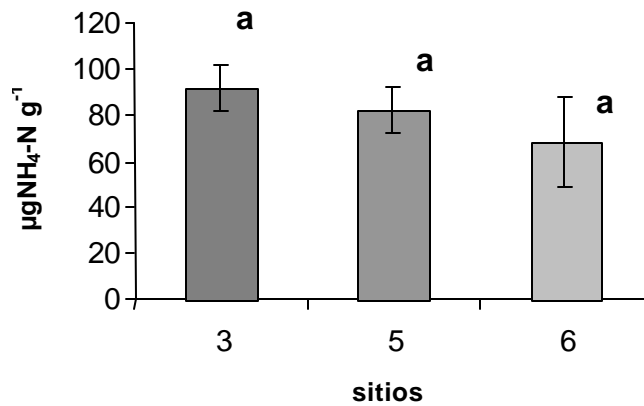
H= Humedad del suelo; R=Resistividad del suelo.



En el caso del carbono orgánico del suelo (COS) los valores promedio de los cuatro sitios (S3, S5, S6 y S8) de estudio no tuvieron diferencias significativas ( $p=0.09$ ; Cuadro 2). Los sitios 3 y 6 tuvieron los valores promedios más bajo ( $22.7$  y  $23.1$   $\text{g kg}^{-1}$ ), en tanto que S5 tuvo el valor promedio intermedio ( $24.7$   $\text{g kg}^{-1}$ ); finalmente, S8 tuvo el mayor contenido de COS ( $29.7$   $\text{g kg}^{-1}$ ; Cuadro 3).

Los valores promedio del Nt del suelo presentaron diferencias significativas entre los sitios de estudio (Cuadro 2). La tendencia del Nt fue la presencia de tres condiciones de concentración que se establecieron en los sitios 3, 6 y 8. La concentración promedio más bajo se presentó en S8 ( $1.4$   $\text{g kg}^{-1}$ ) y la mayor en S3 ( $1.9$   $\text{g kg}^{-1}$ ), en tanto que S5 y S6 tuvieron el valor medio ( $1.7$  y  $1.6$   $\text{g kg}^{-1}$ ). Un parámetro importante de considerar es la relación C/N la cual se encuentra asociada a la parte dinámica del suelo y está relacionada con la movilización e inmovilización de compuestos orgánicos. En este caso la mayoría de los sitios presentaron diferencias significativas en sus valores promedio (Cuadro 2). Las diferencias se establecieron entre S8 y S3, donde S8 tuvo el valor promedio más bajo ( $11.3$ ), en tanto que S3 tuvo el valor promedio más alto ( $20.3$ ). Esto estableció dos condiciones en el proceso de mineralización de la MOS. En el caso de los S5 y S6 tuvieron valores similares al S8 (Cuadro 3).

Finalmente, en el caso del contenido de  $N_{\text{mineralizable}}$  no presentó diferencias significativas entre los sitios de estudio (Cuadro 3). La tendencia de esta variable fue que S6, suelo mas desarrollado, tuvo el valor promedio más bajo ( $68$   $\mu\text{g g}^{-1}$ ), en tanto, que el S3 tuvo el valor promedio más alto ( $91$   $\mu\text{g g}^{-1}$ ; Figura 3). De acuerdo con la tendencia de los datos existe una relación entre el contenido de  $N_{\text{mineralizable}}$  y la relación de C/N, ya que el sitio (S3) presentó una menor relación C/N, cercana a 12, y una mayor concentración de  $N_{\text{mineralizable}}$ . Esto puede asociarse a la mayor descomposición de la materia orgánica del suelo, y por tanto un mayor número de formas de nitrógeno orgánico fácilmente mineralizable.



**Figura 3** Concentración de nitrógeno potencialmente mineralizable en Phaeozems, en un agroecosistema cafetalero bajo sombra. S3, finca La Cabaña; S5 y S6, finca Vista Hermosa.

El contenido de  $P_{\text{disponible}}$  no presentó diferencias significativas entre los sitios ( $p < 0.09$ ; Cuadro 2). En este caso, el contenido de fósforo en el suelo fue heterogéneo. El S6 con el suelo más desarrollado tuvo un valor promedio más bajo ( $202 \text{ mg kg}^{-1}$ ). La concentración más alta se presentó en S8 ( $3499 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y el S3 ( $722.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Finalmente el S5 tuvo el valor intermedio (Cuadro 3).

En el caso de las bases intercambiables se evidenciaron dos tendencias una marcada por el  $K^+$  y otra por el  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . En el caso del  $K^+$  sólo se diferenciaron dos condiciones. En estas se agruparon el S3 ( $0.19 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ), S6, suelo más desarrollado ( $0.28 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) y S8 ( $0.28 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) con los valores promedio más bajos. En el caso de S5 tuvo el valor promedio más alto ( $0.44 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ). En el caso de los valores promedio del contenido de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  se presentaron diferencias significativas entre los sitios de estudio, por lo que se presentaron tres condiciones de concentración (Cuadro 2). En el caso del contenido de calcio, las diferencias se presentaron entre S8 ( $4.8 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) con el valor promedio más bajo, el S3 ( $11.3 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) con el valor promedio más alto y el S6, suelo con mayor desarrollo, con el valor promedio intermedio ( $6.4 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ). En tanto S5 ( $6.4 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) no presentó diferencias significativas con el resto de los sitios (Cuadro 3) y se agrupó con S6 y S8. En cuanto al contenido de magnesio las condiciones en el horizonte superficial fueron tres. En este caso el valor promedio más bajo se presentó en el S8 ( $0.89 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ), S3 tuvo el valor promedio más alto ( $3.1 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ) y S5 y S6 tuvieron el valor promedio intermedio ( $6.4 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ).

Las curvas de mineralización de la materia orgánica en el grupo de los Phaeozems se presentan en la Figura 4, en tanto que la comparación de los valores promedio de carbono producido, de cada sitio, en dos épocas del año, se presenta en el Cuadro 4. Los resultados de la producción de carbono (considerando el carbono acumulado final) no presentó diferencias significativas entre S3 y S6, con diferentes condiciones de ARD (S3 tiene una ARD de 0.075, en tanto que S6 de 0.11). En el caso de la producción de carbono acumulado promedio en la época seca y húmeda no presentó diferencias significativas. En el caso de S3 tuvo valores promedio de carbono acumulado de 3.52 mg C. g C 100 g suelo<sup>-1</sup>, para la época de secas, en tanto que para la época de lluvias fue de 3.79 mg C g C 100 g suelo<sup>-1</sup>. En el caso de S6 el valor promedio del carbono acumulado fue, para la época de secas, de 4.43 mg C g C 100 g suelo<sup>-1</sup> y de 3.82 mg C g C 100 g suelo<sup>-1</sup>, para la época de lluvias (Cuadro 4).

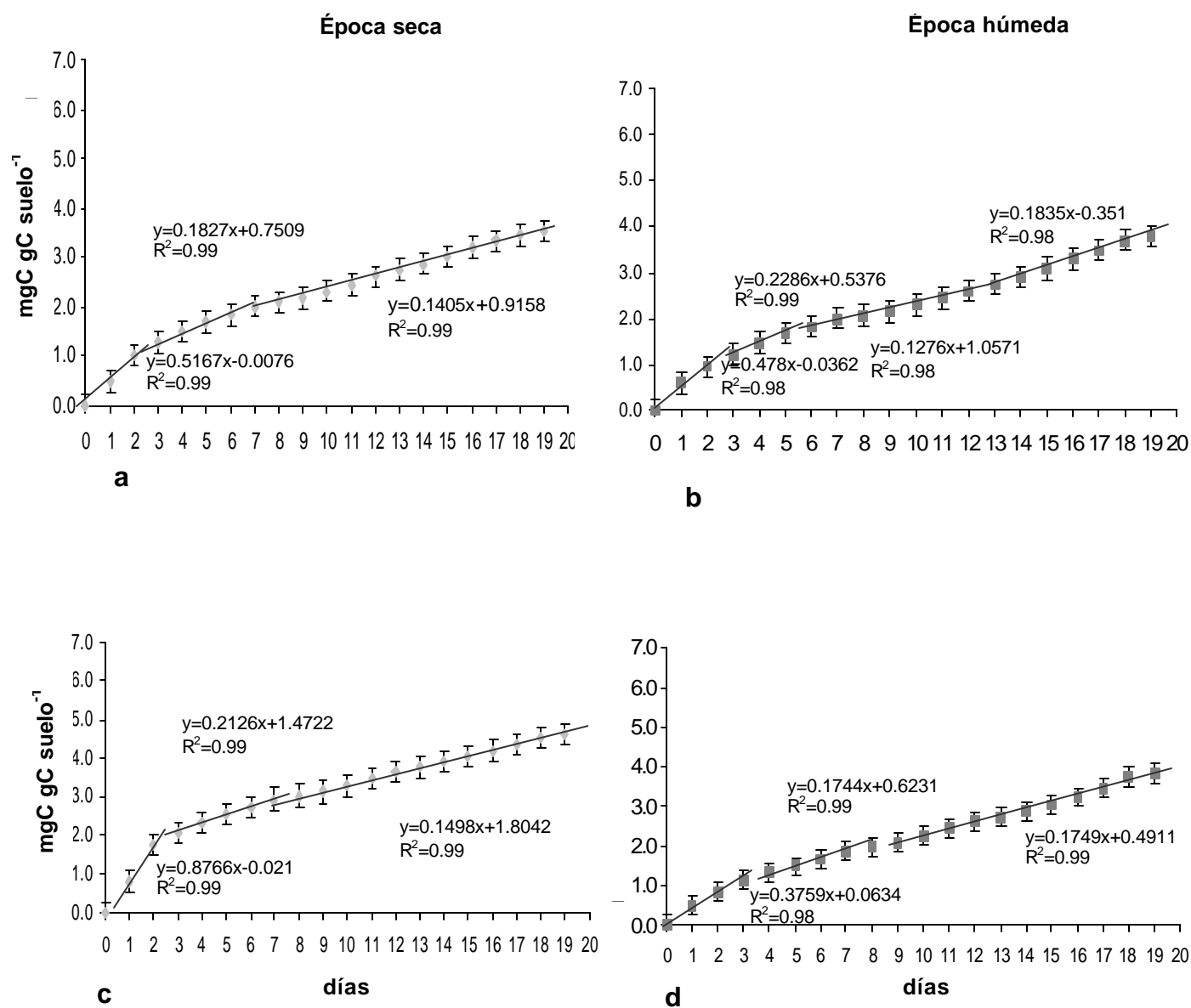
La dinámica de mineralización de la materia orgánica evaluado durante 19 días mostró cambios en su comportamiento. Los cambios, de manera general, presentaron tres etapas, a excepción de la dinámica de S3 en la época húmeda. Las diferentes etapas pueden relacionarse con diferentes formas de carbono en el suelo. Las etapas corresponden a un cambio de la tasa de mineralización durante el tiempo de incubación; esto se relacionó con el cambio de los coeficientes parciales de regresión ( $b_0$ ). El análisis de las curvas acumulativas en S3 y S6, en las dos épocas, mostró una mayor tasa de mineralización en la primera etapa. Los valores del coeficiente parcial de regresión fueron de 0.51 y 0.87, para la época de secas, y de 0.47 y 0.37 para la época húmeda (Figura 4). En las siguientes etapas, la tendencia fue una disminución de los coeficientes parciales de regresión en ambos sitios, en las dos épocas del año (Figura 4). Analizando los sitios, se observó que los mayores coeficientes parciales de regresión se presentaron en S6 en la época seca y que para la época húmeda S3 tuvo un mayor coeficiente de parcial de regresión. En tanto que las dinámicas entre épocas (seca y húmeda) se observó que en S3 en la época húmeda hubo una mayor tasa de mineralización que en la época seca, esto en las etapas dos, tres y cuatro. En el caso de S6 en la época seca hubo un mayor coeficiente de regresión en las etapas 1 y 2, con una tendencia a disminuir en la etapa 3. En tanto que la etapa húmeda los coeficientes fueron más bajo y la tendencia fue a mantenerse con el tiempo. Esto puede relacionarse con las condiciones de ADR ya que S3 tuvo una menor ADR, en tanto que S6 tuvo un ARD mayor.

En cuanto a la variabilidad en la producción de carbono dentro de los sitios se evidenció una heterogeneidad para la época seca (Figura 5a y 5c). En la época húmeda se establece una menor heterogeneidad en las curvas de mineralización (Figura 5b y 5d). Esto puede estar relacionado con el hecho de que hay un mosaico de condiciones relacionado con la ARD, dentro de cada sitios, donde el gradiente de apertura relativa del dosel se estableció entre 0.02 a 0.09, para S3, en tanto que para S6 fue de 0.1 a 0.3 (Figura 5) Otro punto es que las diferencias se pueden deber a diferentes formas de carbono que pueden mineralizarse con diferentes tasas. Los puntos con una menor apertura (P4 y P1) en S3 tuvieron las mayores dinámicas de mineralización, para la época de secas, en tanto, en la época húmeda, hubo una reducción en la dinámica de mineralización en P4 y P1. En el caso de S6, la tendencia fue que P2, con la mayor apertura, tuvo la mayor dinámicas en la época seca y menor dinámica en la época húmeda (Figura 5 c y 5d).

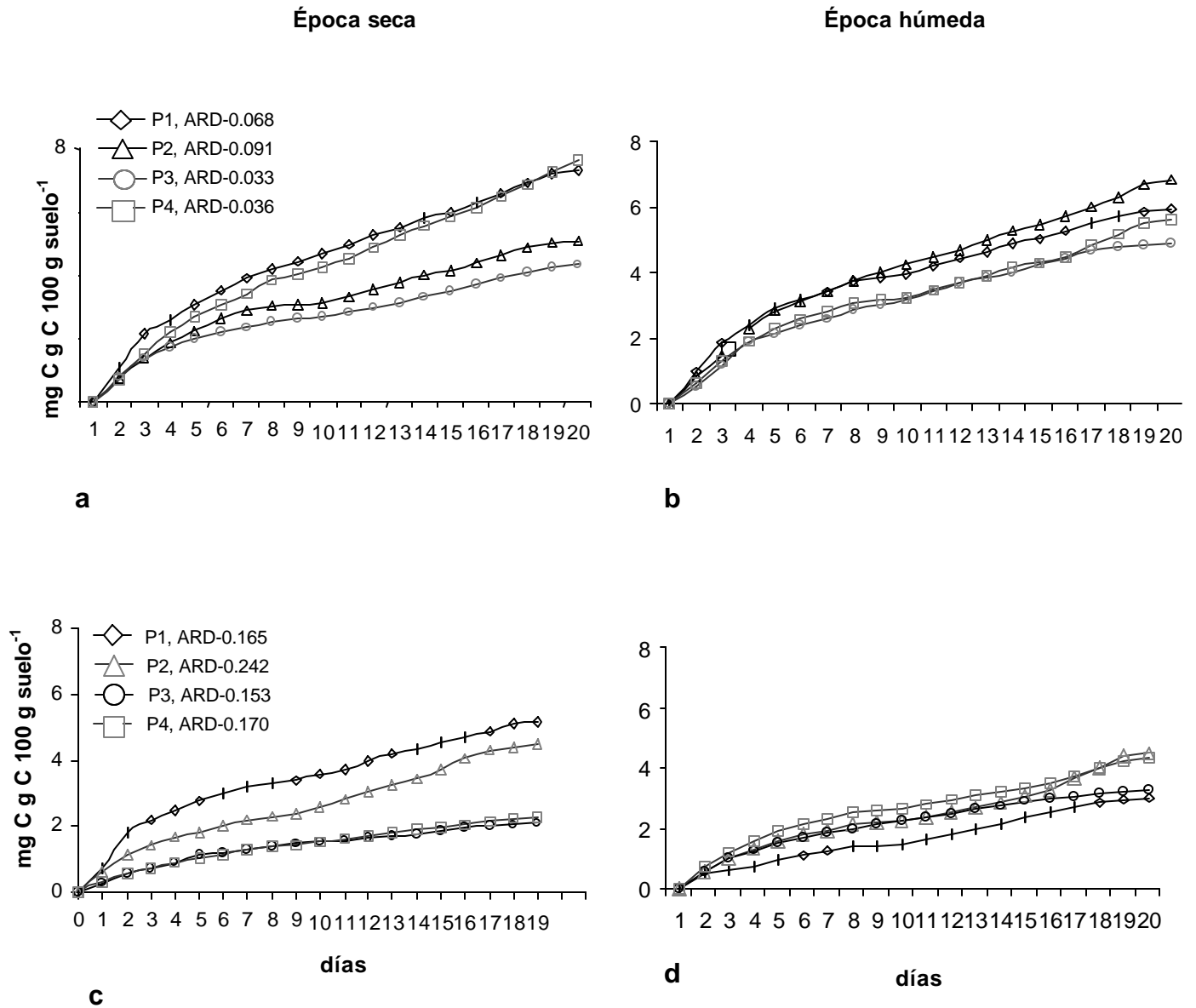
**Cuadro 4.** Valores promedios del coeficiente de mineralización del carbono orgánico (carbono acumulado final) en dos épocas del año en Phaeozems. Los valores dentro de los paréntesis representan la desviación

<b>sitios</b>	<b>época de secas</b> mgC gC suelo <sup>-1</sup>	<b>época de lluvias</b> mgC gC suelo <sup>-1</sup>
<b>S3</b> <i>La Cabaña</i>	3.52 ( 1.5) <sup>a</sup>	3.79 (0.74) <sup>a</sup>
<b>S6</b> <i>Vista Hermosa</i>	4.63 (0.57) <sup>a</sup>	3.82 (±0.48) <sup>a</sup>

estándar. Los supraíndices muestran las diferencias significativas. Los datos para la comparación son logarítmicos (LN). Los valores promedio son de cuatro muestras por sitio en ambas épocas.



**Figura 4.** Curvas acumulativas del coeficiente de mineralización de carbono, en dos épocas del año, en Phaeozems dentro del agroecosistema cafetalero a y b) S3- Phaeozems; La Cabaña; c y d) S6- Phaeozems, Vista Hermosa.



**Figura 5** Curvas acumulativas del coeficientes de mineralización de carbono bajo diferentes condiciones de apertura de dosel, en dos épocas del año, en Phaeozems dentro del agroecosistema cafetalero, a y b) S3 La Cabaña-, c y d) S6-Vista Hermosa.

Los sitios de estudio en Umbrisoles presentaron diferencias significativas en los valores promedios de las variables físicas y químicas, en su horizonte superficial. Las diferencias entre los sitios se establecieron por la humedad del suelo, pH H<sub>2</sub>O, Nt, K<sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (p<0.05; Cuadro 5)

En cuanto a las características físicas, las diferencias entre los sitios se establecieron en el contenido de humedad (Cuadro 5). La tendencia en esta variable fue que S4 tuvo el valor promedio más bajo de 23.1 p:v, en tanto, que S7 tuvo el valor promedio más alto de 32.8 p:v. En el caso de la resistividad, los valores promedio de los sitios no presentaron diferencias significativas. La tendencia entre los sitios fue que S4 tuvo el valor promedio más bajo (94.1 g kg<sup>-1</sup>), en tanto que S7 tuvo el valor promedio más alto (99.7 g.kg<sup>-1</sup>; Cuadro 6).

La caracterización de las propiedades químicas del horizonte superficial evidenció diferencias significativas entre los sitios de estudio. Las diferencias se establecieron por el pH en H<sub>2</sub>O, Nt, N<sub>mineralizable</sub> Mg y K. El resto de las variables químicas evaluadas no presentaron diferencias significativas entre los sitios (Cuadro 5).

En el caso de la reacción del suelo se determinó como ligeramente ácida, en ambos sitios. El S7 tuvo el valor promedio más bajo (pH 5.5) mientras que S4 tuvo el valor promedio más alto (pH 5.8). En el caso de la acidez potencial los sitios presentaron un valor promedio de pH 4.5. La tendencia entre los sitios fue una diferencia en la acidez (real y potencial), ya que el S7 tuvo una diferencia de 1, en tanto que para el S4 fue de 1.3.

En el caso del COS, los sitios de estudio no presentaron diferencias significativas en los valores promedio (Cuadro 5). La tendencia fue que S4 tuvo el valor promedio más bajo (27.3 g kg<sup>-1</sup>), en tanto que S7 tuvo el mayor valor promedio (32.7 g kg<sup>-1</sup>). Las bajas diferencias entre los sitios se debieron a la variabilidad del contenido de carbono dentro de los sitios.

La concentración promedio del Nt del suelo presentó diferencias significativas entre los sitios de estudio (Cuadro 5). El valor promedio más alto se estableció en S7 mientras que S4 tuvo la concentración más baja (Cuadro 6). En cuanto a la relación C:N no presentó diferencias significativas. En este caso la dinámica de descomposición de la materia orgánica fue muy similar en ambos sitios, ya que el S4 tuvo una relación de 12, en tanto que el S7 fue 14.9 (Cuadro 6). Finalmente, la porción de nitrógeno orgánico potencialmente mineralizable tuvo diferencias significativas entre los valores promedio de

los sitios de estudio (Cuadro 5). El valor promedio más alto de  $\text{NH}_4\text{-N}$  se presentó en S4 ( $74 \mu\text{g g}^{-1}$ ) en tanto que el S7 tuvo un valor promedio de  $40 \mu\text{g g}^{-1}$  (Cuadro 6 y Figura 6).

**Cuadro 5.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial en Umbrisoles, en dos sitios de estudio dentro de un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio son de 10 muestras de suelo por sitio. Los valores significativos se encuentran en negritas.

Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	p
Resistividad ( $\text{kg m}^{-2}$ )	sitio	156.8	1	156.8	0.32	0.58
	error	9341	18	518.9		
*Humedad (p:v)	sitio	0.119	1	0.11	<b>43.9</b>	<b>&lt;0.05</b>
	error	0.048	18	0.002		
pH $\text{H}_2\text{O}$	sitio	0.512	1	0.51	<b>2.5</b>	<b>0.01</b>
	error	1.270	18	0.07		
pH KCl	sitio	0.0005	1	0.0005	0.007	0.93
	error	1.249	18	0.06		
**COS ( $\text{g kg}^{-1}$ )	sitio	0.524	1	0.52	0.73	0.40
	error	8.516	12	0.70		
Nt ( $\text{g kg}^{-1}$ )	sitio	0.800	1	0.80	<b>4.6</b>	<b>0.04</b>
	error	3.112	18	0.17		
$\text{N}_{\text{mineralizable}}$ ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Sitio	0.002	1	0.002	<b>6.1</b>	<b>0.02</b>
	error	0.03	18	0.001		
C/N	sitio	24.139	1	24.1	1.8	0.19
	error	235.7	18	13.0		
**P <sub>disponible</sub> ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	sitio	0.524	1	0.5	0.73	0.40
	error	8.516	12	0.70		
**K <sup>+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	5.146	1	5.1	<b>25.4</b>	<b>&lt;0.05</b>
	error	3.640	18	0.20		
Ca <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	0.005	1	0.005	0.002	0.96
	error	43.89	18	2.4		
Mg <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	sitio	3.240	1	3.2	<b>10.6</b>	<b>0.004</b>
	Error	5.492	18	0.30		

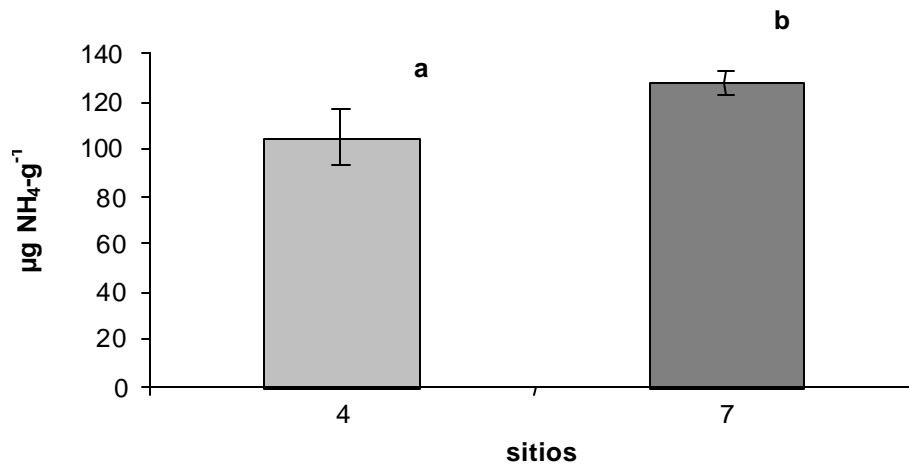
Datos transformados a \* ln y \*\*  $\log_{10}$



**Cuadro 6.** Características físicas y químicas del horizonte superficial de Umbrisoles en un agroecosistema cafetalero, en la comunidad de Pluma Hidalgo. Los valores promedio son de 10 datos de las muestras de suelo y los números entre paréntesis representan el error estándar. Los supraíndices señalan las diferencias significativas entre sitios ( $p < 0.05$ ).

Sitio de estudio	H p:v	R g kg <sup>-1</sup>	pH 1:5		COS g kg <sup>-1</sup>	Nt	N <sub>mineralizabl</sub> µg g <sup>-1</sup>	C/N	P <sub>disponible</sub> mg kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup> cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>		
			H <sub>2</sub> O	KCl								
<i>Palo piedra, La Cabaña</i>												
S4	23.1 <sup>a</sup> (1.0)	94.1 <sup>a</sup> (5.1)	5.8 <sup>a</sup> (0.11)	4.5 <sup>a</sup> (0.10)	23.7 <sup>a</sup> (1.9)	1.8 <sup>a</sup> (0.11)	104 <sup>a</sup> (0.01)	12.7 <sup>a</sup> (0.9)	210.4 <sup>a</sup> (19.4)	0.15 <sup>a</sup> (0.01)	6.2 <sup>a</sup> (0.4)	1.6 <sup>a</sup> (0.2)
<i>Los Pocitos, Vista Hermosa</i>												
S7	32.8 <sup>b</sup> (0.9)	99.7 <sup>a</sup> (8.7)	5.5 <sup>b</sup> (0.02)	4.5 <sup>a</sup> (0.06)	32.7 <sup>a</sup> (0.16)	2.2 <sup>b</sup> (0.1)	128 <sup>b</sup> (0.005)	14.9 <sup>a</sup> (1.2)	3291.4 <sup>a</sup> (98.6)	0.45 <sup>b</sup> (0.07)	6.2 <sup>a</sup> (0.48)	1.2 <sup>b</sup> (0.2)

H=Humedad, R=Resistividad



**Figura 6.** Concentración de nitrógeno potencialmente mineralizable en un agroecosistema cafetalero bajo sombra. S4, finca La Cabaña; S7, finca Vista Hermosa.

En el caso de las concentraciones promedio de  $P_{\text{disponible}}$ , de los sitios de estudio no presentaron diferencias significativas (Cuadro 5). En este caso, a pesar de que los valores promedio muestran condiciones heterogéneas entre los sitios la variabilidad en los sitios fue muy alta por lo que las diferencias no se evidenciaron. La tendencia en estos suelos fue que S4 tuvo el valor promedio más bajo ( $210.4 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y S7 presentó el valor promedio más alto ( $3291 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Cuadro 6).

En el caso de las bases intercambiables, los sitios tuvieron una tendencia a diferenciarse por la concentración promedio de  $K^+$  y  $Mg^{2+}$  (Cuadro 5). La tendencia del  $K^+$  fue que la menor concentración se estableció en S4 mientras que S7 tuvo el valor promedio más alto. En el caso del  $Mg^{2+}$  la tendencia fue que S4 tuvo una concentración ligeramente más alta que el S7. Finalmente, el calcio no presentó diferencias significativas entre los sitios ya que S4 y S7 tuvieron un contenido promedio de  $6.2 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$  (Cuadro 6).

Las curvas de mineralización de la materia orgánica del suelo en Umbrsioles se presentan en la Figura 7, en tanto que la comparación de los valores promedio de carbono acumulado, de cada sitio, en dos épocas del año, se presenta en el Cuadro 7.

La dinámica de producción de carbono se realizó para uno de los sitios de estudio debido a que no se presentaron condiciones contrastante de apertura del dosel. El análisis contempló la dinámica en dos épocas de año (Figura 7) y la variación de la dinámica dentro del sitio debido a al variabilidad de condiciones del dosel (Figura 8).

Los resultados de la producción de carbono (considerando el carbono acumulado final) no presentó diferencias significativas entre la época seca y húmeda. Los valores promedio en S7, en la época seca, fue de  $3.82 \text{ mg C g C } 100\text{g suelo}^{-1}$ , en tanto que para la época húmeda, fue de  $3.58 \text{ mg C g C } 100 \text{ g suelo}^{-1}$  (Cuadro 7).

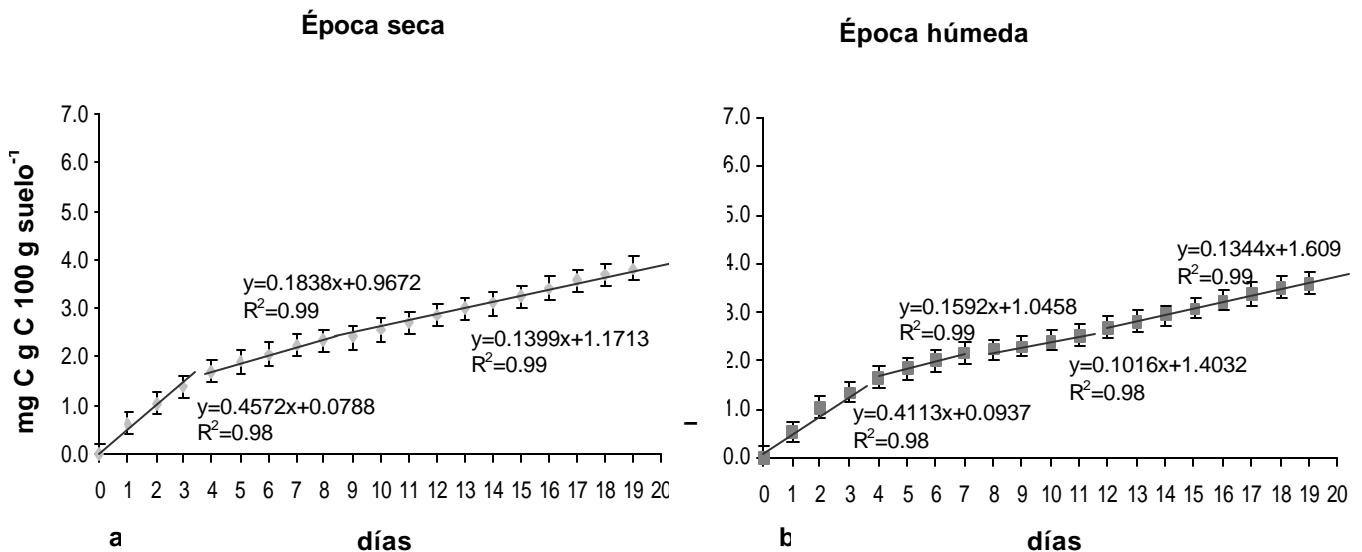
La dinámica de mineralización de la materia orgánica presentó tres etapas en la época seca y cuatro para la época húmeda. Esto puede relacionarse con las diferentes formas de carbono en el suelo. Las etapas correspondieron con el cambio de la tasa de mineralización durante el tiempo de incubación; esto se relacionó con el cambio de los coeficientes parciales de regresión ( $b_0$ ). El análisis de las curvas acumulativas, en las dos épocas, mostró una mayor tasa de mineralización en la primera etapa, ya que los valores del coeficiente parciales de regresión fueron 0.45 para el suelo de la época seca y de 0.41 para la época húmeda (Figura 7). Posteriormente, la tasa de mineralización disminuyó con el tiempo de incubación, ya que se encontró el menor coeficiente en la etapa 3, en ambas

épocas del año (Figura 4). Los valores similares del coeficiente parcial de regresión evidenciaron la estabilidad en el proceso de producción de carbono durante ambas épocas. La disminución en de la tasa de mineralización en la etapa 3 puede ser el resultado de la alta actividad de mineralización de la materia orgánica (Figura 7).

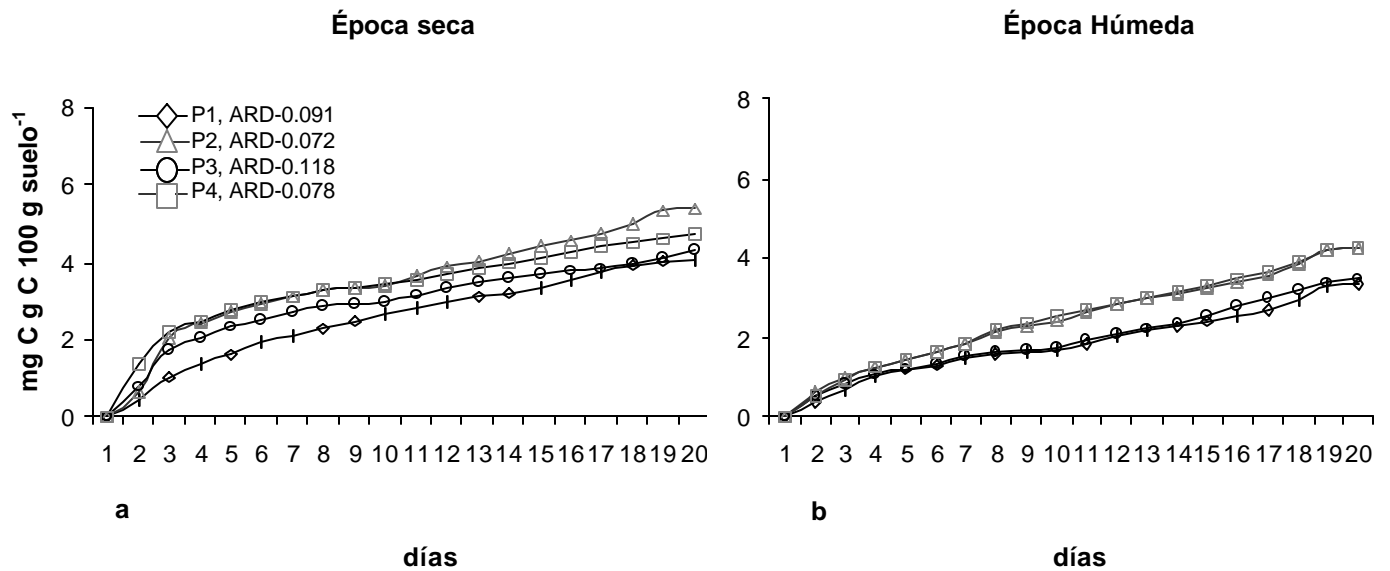
En cuanto a la variabilidad de la dinámica de mineralización de la materia orgánica, dentro del sitio, fue heterogénea para la época seca (Figura 5a y 5c), en tanto que para la época húmeda se estableció una menor heterogeneidad en la dinámica de mineralización (Figura 8a y 8b). Esto puede estar relacionado con el hecho de que hay un mosaico de condiciones relacionada con la ARD donde el gradiente de apertura relativa del dosel, dentro del sitio, se estableció entre 0.078 a 0.18. Así como por la formación de microsistios de mineralización. En este caso, el punto dentro del sitio con el mayor valor de ARD (P3) tuvo la menor dinámica de mineralización, esta tendencia se mantuvo en la época húmeda, en tanto que el sitio con la menor apertura (P2) tuvo la mayor dinámica de mineralización, en ambas etapas. Esto muestra una estabilidad de condiciones del carbono en el sitio a pesar del cambio de actividad de mineralización (Figura 8).

**Cuadro 7.** Valores promedio del coeficiente de mineralización del carbono en dos épocas del año en Umbrisoles. Los valores dentro de los paréntesis representan la desviación estándar. Los supraíndices muestran las diferencias significativas. Los datos para la comparación son logarítmicos (log10).

Variable	S7 Época secas	S7 Época húmeda
mg C /gC del suelo día	3.82 (0.4) <sup>a</sup>	3.58 (0.6) <sup>a</sup>



**Figura 7.** Curvas acumulativas del coeficiente de mineralización de carbono, en dos épocas del año, en Umbrisoles dentro del agroecosistema cafetalero a y b) S7- Umbrisoles de la finca La cabaña.



**Figura 8.** Curvas acumulativas del coeficiente de mineralización de carbono, en diferentes condiciones de apertura relativa de dosel, en dos épocas del año, en Umbrisoles dentro del agroecosistema cafetalero a y b) S7- Umbrisoles de la finca La cabaña.

El análisis de medias de las características físicas y químicas de los suelos caracterizados como Luvisoles (S1 y S2) tuvieron pocas diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las diferencias significativas se establecieron por la resistividad y las bases del suelo, en particular por el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Cuadro 8).

En el caso de las características físicas, los valores promedio de la humedad del suelo no presentaron diferencias significativas. La tendencia de esta variable fue que S1 tuvo mayor humedad con respecto a S2. En cuanto a la resistividad tuvo diferencias significativas entre los valores promedio de los sitios de estudio. En este caso S1 tuvo el valor promedio más bajo, en tanto que S2 presentó el valor promedio más alto (Cuadro 9).

En cuanto a las características químicas no presentaron diferencias significativas entre los valores promedio de pH, COS, Nt, C/N,  $N_{\text{mineralizable}}$ ,  $P_{\text{disponible}}$  y K (Cuadro 8). La tendencia de las variables químicas fue homogénea, ya que la variabilidad de los valores promedio fueron muy pequeñas, esto sobre todo en el pH, COS y Nt, C:N. En el caso del  $N_{\text{mineralizable}}$ ,  $P_{\text{disponible}}$  y  $\text{K}^+$  la variabilidad de las concentraciones dentro del sitio no permitió evidenciar diferencias significativas. Las variables que presentaron diferencias significativas entre sus valores promedio fueron el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . En estos sitios de estudio se observó que S1 tuvo la mayor concentración de calcio y magnesio ( $10.3$  y  $3.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ , respectivamente), mientras que el S2 tuvo los valores promedio más bajos de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $0.6$  y  $8.7 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ , respectivamente (Cuadro 9). En el caso del K, a pesar de no presentar diferencias significativas entre los sitios (Cuadro 8), la tendencia fue que S1 tuvo el valor promedio más alto en tanto que S2 presentó el valor promedio más bajo, siguiendo el patrón del calcio y magnesio (Cuadro 9).

Las concentraciones del  $N_{\text{mineralizable}}$  del suelo en S1 y S2 no presentaron diferencias significativas claras aunque la tendencia fue a presentar diferencias residuales (Cuadro 8). A pesar de esto, la tendencia fue que S1 tuvo el valor promedio más alto, aunque las variaciones, dentro del sitio, en el contenido de  $\text{NH}_4\text{-N}$  fueron muy grandes. En el caso del S2, la concentración fue menor y la variabilidad de los datos fue muy pequeña (Figura 9). En S1 se presentó una concentración de  $0.19 \text{ mg g}^{-1}$ , en tanto que el S2 tuvo el valor promedio más bajo de  $0.09 \text{ mg g}^{-1}$  (Cuadro 9)

En el caso del  $P_{\text{disponible}}$ , no hubo diferencias significativas entre los valores promedio de los sitios (Cuadro 8). En este caso el S1 tuvo el valor promedio más alto ( $117.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) mientras que el S2 tuvo un valor promedio de  $77.9 \text{ mg kg}^{-1}$  (Cuadro 9).

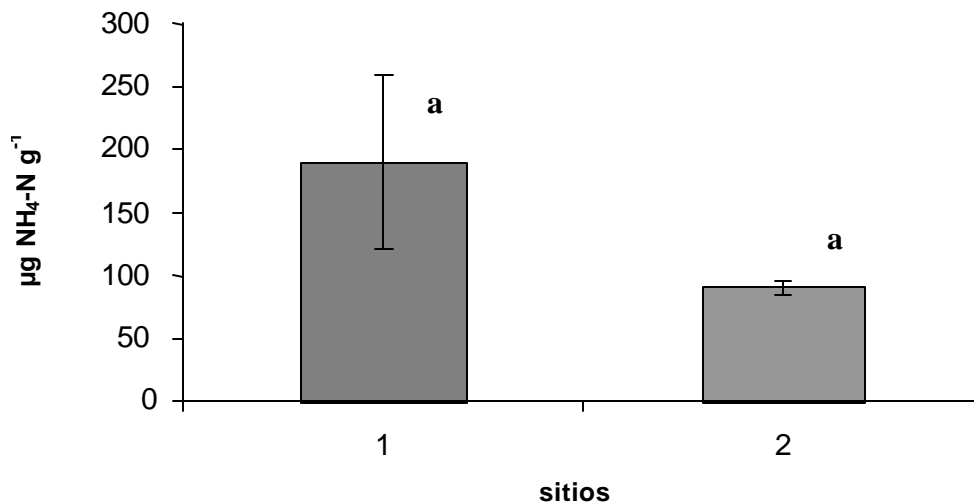
**Cuadro 8.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial en Luvisoles, en dos sitios de estudio dentro de un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio son de 10 muestras de suelo por sitio. Los valores significativos se encuentran en negritas.

Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	P
Resistividad (kg m <sup>-2</sup> )	sitio	378.45	1	378.45	<b>5.26</b>	<b>0.03</b>
	error	1293.38	16	71.85		
Humedad (p:v)	sitio	11.25	1	11.25	0.18	0.67
	error	1089.9	16	60.55		
pH (H <sub>2</sub> O)	sitio	0.008	1	0.0080	0.16	0.69
	error	0.912	16	0.0507		
pH (KCl)	sitio	0.050	1	0.0500	0.64	0.43
	error	1.39	16	0.0773		
COS (g kg <sup>-1</sup> )	sitio	1.39	1	1.39	0.02	0.88
	error	1234.19	16	68.57		
Nt (g kg <sup>-1</sup> )	sitio	0.04	1	0.0470	0.36	0.55
	error	2.33	16	0.1297		
N <sub>mineralizable</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	sitio	0.82	1	0.828	3.42	0.08
	error	4.35	16	0.242		
C/N	sitio	2.45	1	2.45	0.28	0.59
	error	154.4	16	8.58		
P <sub>disponible</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	sitio	7982.0	1	7982.0	1.63	0.21
	error	88067.6	16	1.63		
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	sitio	0.10	1	0.101	1.89	0.18
	error	0.96	16	0.053		
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	sitio	11.7	1	11.7	<b>5.35</b>	<b>0.03</b>
	error	39.5	16	2.20		
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	sitio	1.89	1	1.8991	<b>9.07</b>	<b>0.007</b>
	error	3.76	16	0.209		

Datos transformados a \*ln y \*\* log<sub>10</sub>

**Cuadro 9.** Características físicas y químicas del horizonte superficial de Luvisoles en un agroecosistema cafetalero, en la comunidad de Pluma Hidalgo. Los valores promedios son de 10 datos de muestras de suelo y los números entre paréntesis representan el error estándar. Los supraíndices señalan las diferencias significativas entre sitios ( $p < 0.05$ ).

Sitio de estudio	H v:v	R g kg <sup>-1</sup>	pH 1:5 H <sub>2</sub> O	KCl	COS g kg <sup>-1</sup>	Nt	N <sub>mineralizable</sub> μg g <sup>-1</sup>	C/N	P mg kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup>
<i>Sitio 1. La cañería, La Cabaña</i>												
	26.4 <sup>a</sup> (3.0)	25.8 <sup>a</sup> (3.1)	5.8 <sup>a</sup> (0.08)	4.7 <sup>a</sup> (0.09)	38.9 <sup>a</sup> (2.9)	1.9 <sup>a</sup> (0.7)	190 <sup>a</sup> (0.11)	15.9 <sup>a</sup> (0.9)	117.9 <sup>a</sup> (26.1)	0.80 <sup>a</sup> (0.07)	10.3 <sup>a</sup> (0.5)	3.6 <sup>a</sup> (0.14)
<i>Sitio 2. La cañería, La cabaña</i>												
	24.9 <sup>a</sup> (1.6)	34.5 <sup>b</sup> (2.1)	5.9 <sup>a</sup> (0.05)	4.8 <sup>a</sup> (0.07)	38.4 <sup>a</sup> (2.2)	0.9 <sup>a</sup> (0.05)	100 <sup>a</sup> (0.1)	14.5 <sup>a</sup> (0.8)	77.9 <sup>a</sup> (7.1)	0.65 <sup>a</sup> (0.07)	8.7 <sup>b</sup> (0.4)	3.0 <sup>b</sup> (0.14)



**Figura 9.** Concentración de nitrógeno potencialmente mineralizable en un agroecosistema cafetalero bajo sombra. S1 y S2, finca La Cabaña.

Las curvas del índice de mineralización de la materia orgánica del suelo en Luvisoles se presentan en la Figura 10, en tanto que la comparación de los valores promedio de carbono acumulado, de cada sitio, en dos épocas del año, se presenta en el Cuadro 10.

En este caso sólo se analizaron la dinámica entre las dos épocas de año debido a que las diferencias en condiciones del dosel no fueron claras. Los resultados de la producción de carbono (considerando el carbono acumulado final) no presentaron diferencias significativas entre la época seca y húmeda, a pesar de la tendencia de los valores. La alta variabilidad del carbono producido en la incubación, en los diferentes puntos muestreados, hizo que las diferencias entre las épocas del año no fueran evidentes ( $T_6 = 0.324$ ,  $p = 0.75$ ). En la época de secas S1 tuvo una concentración promedio de  $6.11 \text{ mg C g C } 100 \text{ g de suelo}^{-1}$  y de  $5.82 \text{ mg C g C } 100 \text{ g de suelo}^{-1}$ , en la época de lluvias (Cuadro 10).

La dinámica del índice de mineralización de la materia orgánica presentó cuatro etapas en ambas épocas. Las etapas correspondieron con el cambio de la tasa de mineralización durante el tiempo de incubación; esto se relacionó con el cambio de los coeficientes parciales de regresión ( $b_0$ ). El análisis de las curvas acumulativas, en las dos épocas, mostró una mayor tasa de mineralización en la primera etapa, ya que los valores del coeficiente de parcial de regresión fueron mayores de 0.704 y 0.709. Posteriormente, la tasa de mineralización fue menor en ambas épocas. Lo que mostraron las curvas acumulativas fue que para la época de la mineralización tuvo una mayor heterogeneidad en su dinámica sobre todo entre las etapas dos, tres y cuatro. En tanto que para la época húmeda la dinámica de mineralización presentó pocas variaciones por lo que la tendencia fue que se mantuvo la producción de carbono con el tiempo de incubación (Figura 4). La similitud en tasa de degradación en los Luvisoles muestra una tendencia de estabilidad del carbono que puede estar dado por el suelo o por la calidad de materia orgánica. La etapa donde se presentaron los mayores cambios en la tasa de mineralización de la materia orgánica en la época de seca puede relacionarse con los diferentes formas de carbono y micrositios de mineralización.

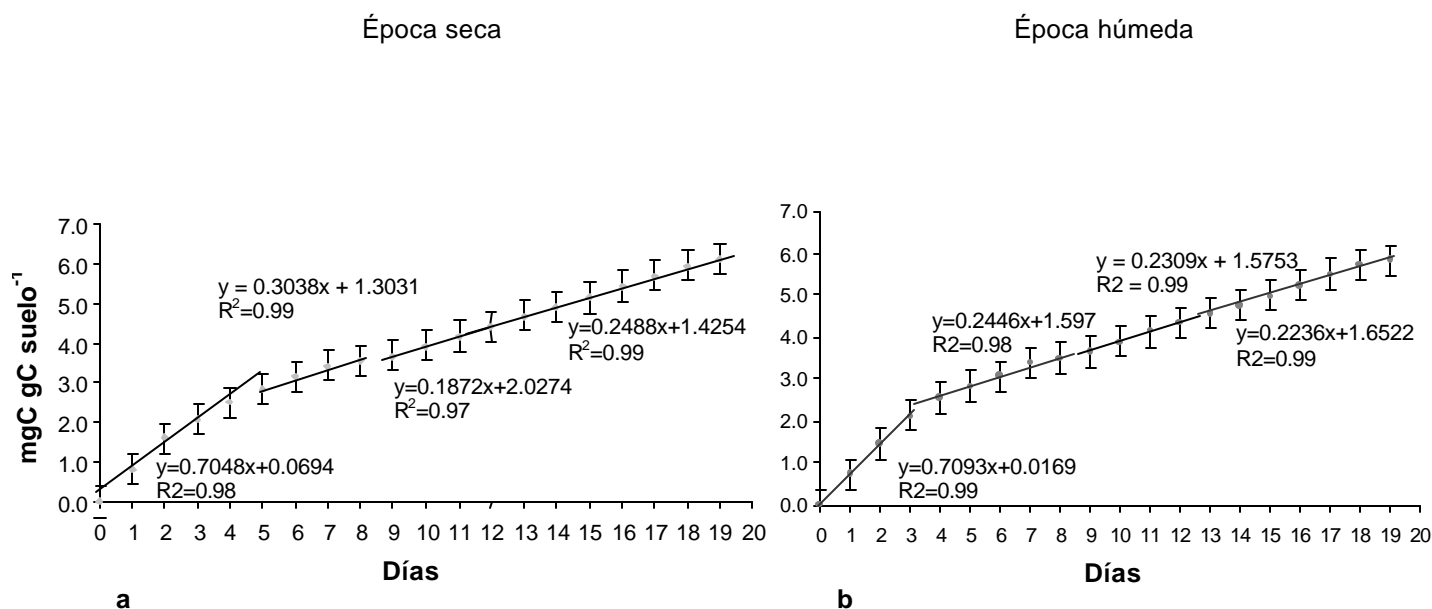
En cuanto a la variabilidad en la dinámica del índice de mineralización de la MOS, dentro del sitio de estudio, se observó que en la época húmeda hubo una mayor variabilidad en la dinámica de los puntos muestreados que en la época secas (Figura 11a y 11b). En este caso el mosaico de condiciones relacionada con la ARD presenta un



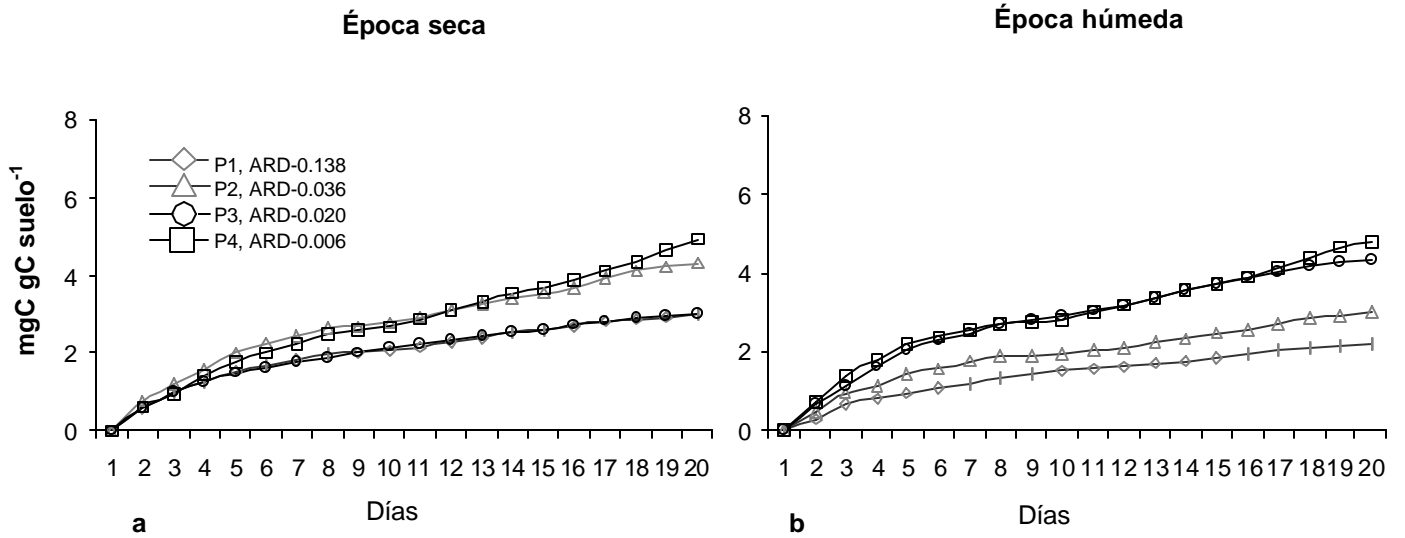
gradiente entre 0.006 a 0.138. El punto, dentro del sitio, con el mayor valor de ARD (P1) tuvo una menor dinámica de mineralización, esta tendencia se mantuvo en la época húmeda. En tanto que el punto (P4) con una menor apertura tuvo una mayor dinámica de mineralización en ambas épocas (Figura 11). Esta tendencia mantener la dinámica de mineralización de los puntos muestra que las forma de estabilidad del carbono ya sea por el suelo o por las fuentes de carbono de la misma calidad.

**Cuadro 10.** Valores promedio del coeficiente de mineralización de carbono, en dos épocas del año, en Luvisoles. Los valores dentro de los paréntesis representan la desviación estándar. Los supraíndices muestran las diferencias significativas. Los datos para la comparación son logarítmicos (log10).

Variable	S7 época de secas	S7 Época de lluvias
mg C /gC del suelo día	6.11 (1.6) <sup>a</sup>	5.82 (0.8) <sup>a</sup>



**Figura 10.** Curvas del coeficiente de mineralización de carbono, en dos épocas del año, en Luvisoles dentro del agroecosistema cafetalero, a y b) S1- Luvisoles de la finca La cabaña.



**Figura 11.** Curvas del coeficiente de mineralización de carbono, en dos épocas del año, bajo diferentes condiciones de apertura relativa del dosel, en Luvisoles dentro del agroecosistema cafetalero, a y b) S1- Luvisoles de la finca La cabaña.

#### 4.4 Caracterización del dosel y productividad del agroecosistema cafetalero

El análisis de la cantidad de luz disponible para cada sitio de estudio se puede observar en las Figuras 12, 14 y 16. Las condiciones del dosel están influenciadas por el manejo agrícola relacionado con el control de la exposición solar de los cafetos; así como por la defoliación debido a la influencia de los huracanes Paulina (1997) y Rick (2001). El análisis y la comparación de la apertura relativa del dosel (ARD) se llevó a cabo para cada uno de los sitios en las tres unidades de suelo.

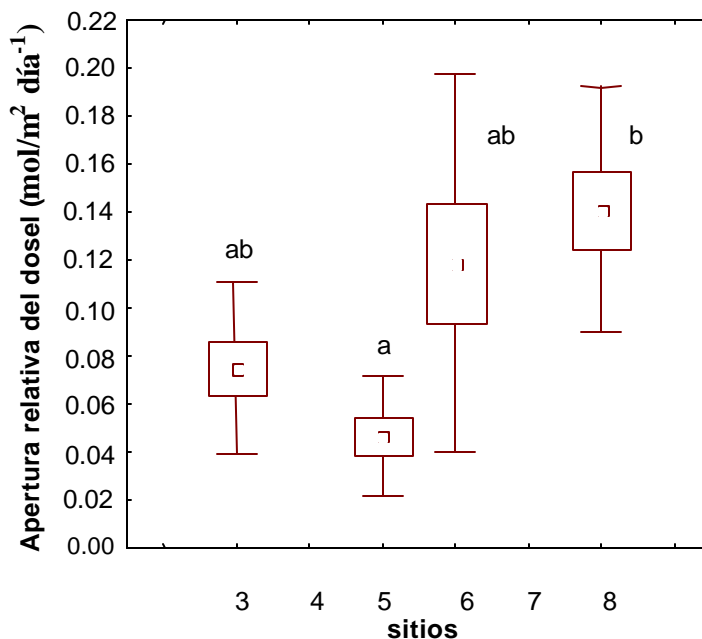
Las condiciones del dosel en los sitios, sobre Phaeozems, presentaron diferencias significativas entre los valores promedio de la apertura relativa del dosel (ARD; Cuadro 11). Donde S5 tendió a diferenciarse del resto de los sitios con el valor promedio de ARD más bajo. Los valores promedio de apertura se establecieron entre 0.047 (S5) y 0.141 (S8; Figura 12).

**Cuadro 11.** Caracterización de la apertura relativa del dosel y productividad del cafetal en Phaeozems, en un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio fueron de 10 datos por sitio.

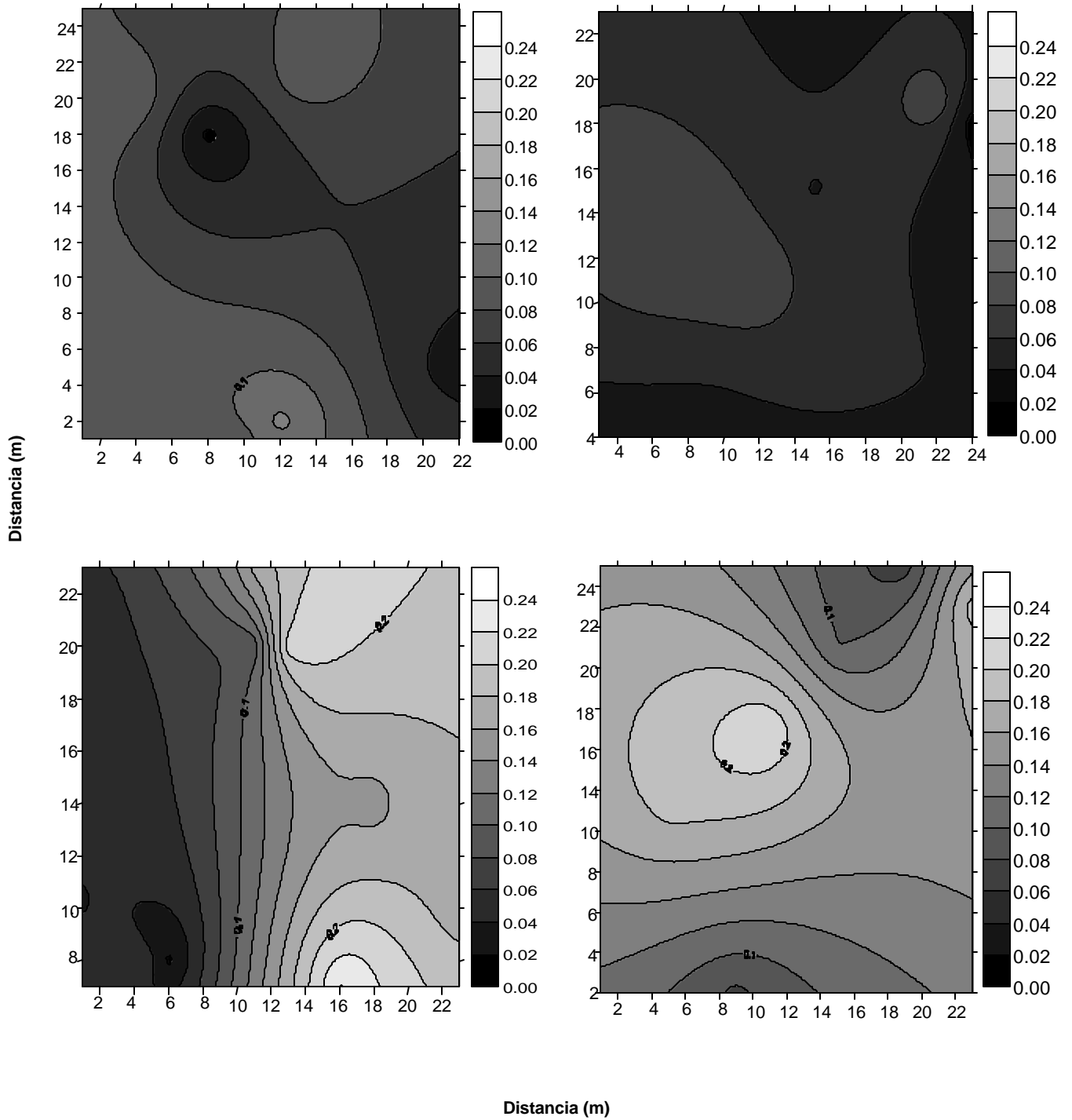
Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	p
*ARD	sitio	1.50	3	0.50062	<b>5.82</b>	<b>0.002</b>
	error	3.09	36	0.08600		
Productividad g.m <sup>2</sup>	sitio	1.83	3	0.6118	23.34	0.094 n.s
	error	7.30	28	0.2608		

ARD= Apertura relativa del dosel.

\* Datos transformados Log<sub>10</sub>



**Figura 12.** Valores promedio de la apertura relativa del dosel ( $\pm$ es) del agroecosistema cafetalero sobre Phaeozems. S3=0.075( $\pm$ 0.011), La Cabaña; S5=0.047( $\pm$ 0.008), S6=0.110( $\pm$ 0.025) y S8=0.141( $\pm$ 0.016), Vista Hermosa.



**Figura 13.** Distribución de la apertura relativa del dosel en sitios sobre *Phaeozem* en un agroecosistema cafetalero, a) S3-La Cabaña, b) S5-Vista Hermosa, c) S6- Vista hermosa y d) S8-Vista Hermosa.

La distribución del dosel, se analizó mediante la extrapolación de los valores de luz difusa, esto se encuentra representado en mapas de distribución para cada uno de los sitios (Figura 13).

La mayor homogeneidad en la distribución de la apertura del dosel se presentó en el S3 y S5; donde se encontró la menor cantidad de luz disponible. En tanto, S6 y S8 tuvieron condiciones más heterogéneas con una mayor complejidad en la distribución de la ARD, además fueron los que presentaron los mayores valores de apertura. El S3 tuvo la menor apertura y sus valores se establecieron entre 0.02 a 0.14. La zona de mayor apertura en este sitio se encontró en la porción oeste-suroeste de la parcela, en el resto de la parcela las condiciones fueron más homogéneas y con una menor apertura. En el caso de S5 se presentaron valores bajos de ARD, entre 0.02 a 0.10. Las condiciones de menor cantidad de luz difusa se establecieron en pequeños parches en la porción norte, este y corre hacia la porción sur del sitio. En el caso de los sitios 6 y 8 presentaron la mayor heterogeneidad en la distribución de la luz disponible. Los valores relativos se establecieron entre 0.06 a 0.18, para el S6. En este caso hubo una distribución gradual de la apertura del dosel. Los sitios con mayor apertura se establecieron en un gradiente desde la porción central hacia el este, en tanto que la zona con menor exposición se estableció en sentido contrario, de la porción central al oeste. En S8 se presentaron valores relativos entre 0.02 a 0.22. La mayor apertura, de manera general, predominó en la mayor parte del sitio, siendo dominante en la porción media de la parcela. Las zonas con menor apertura fueron parches en las porciones norte y sur del sitio (Figura 13).

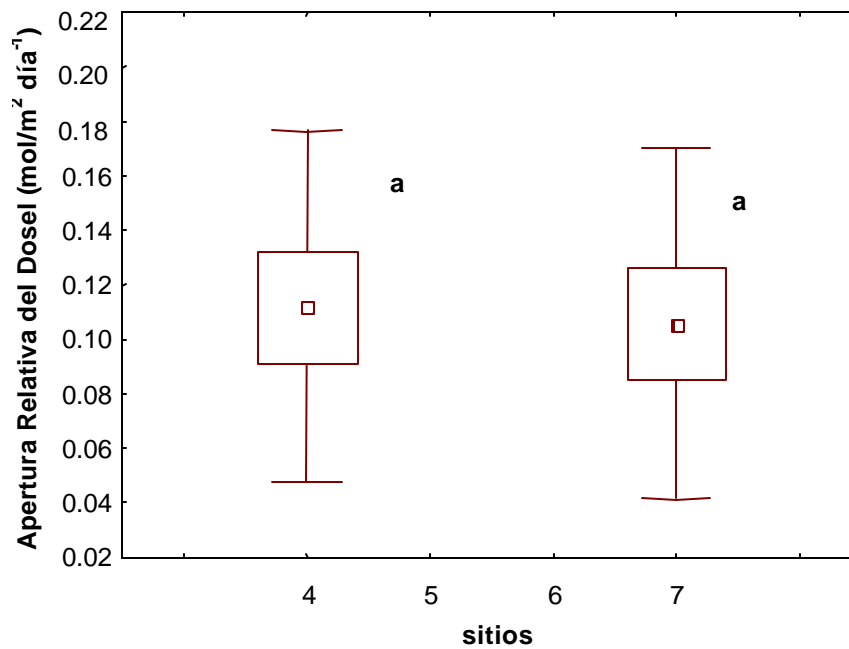
La cobertura del dosel en los Umbrisoles, no presentó diferencias significativas entre los sitios ( $p < 0.05$ ; Cuadro 12). En este caso la tendencia de los valores promedios muestra que S7 tuvo un valor ligeramente menor de apertura. Las diferencias entre los sitios se observan en la Figura 14, en tanto que la distribución de la luz disponible en la Figura 15.

**Tabla 12.** Caracterización de la apertura relativa del dosel y la producción de café en sitios sobre Umbrisoles, en un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio son de 10 muestras superficiales de suelo.

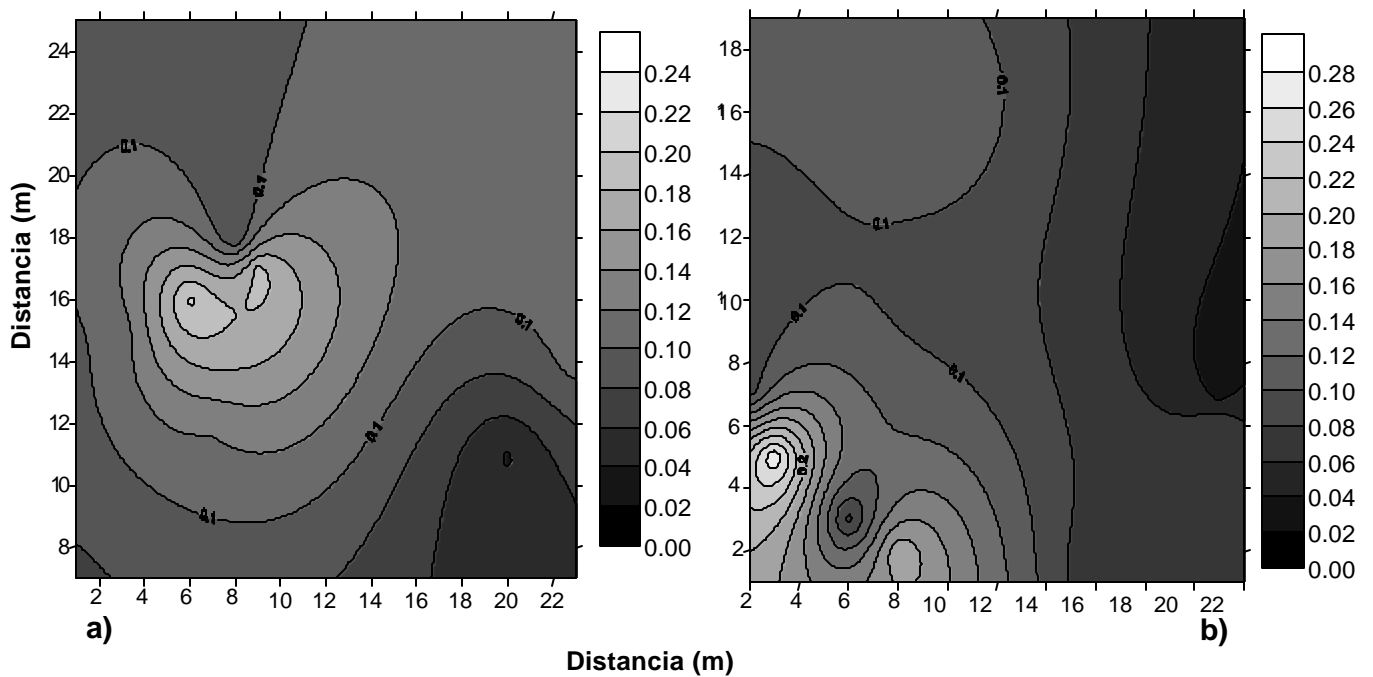
Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	p
*ARD	sitio	0.00019	1	0.0001	0.046	0.83
	error	0.0747	18	0.0041		
Productividad g.m <sup>2</sup>	sitio	1.8355	3	0.6118	23.34	0.094
	error	7.3027	28	0.2608		

ARD- Apertura relativa del dosel

\* Datos log<sub>10</sub>



**Figura 14.** Valores promedio de la apertura relativa del dosel ( $\pm$ es) del agroecosistema cafetalero sobre Umbrisoles, S4=0.112 ( $\pm$ 0.016), La Cabaña; S7=0.101 ( $\pm$ 0.042) Vista Hermosa.



**Figura 15.** Distribución de la apertura relativa del dosel en el agroecosistema cafetalero que se establece sobre Umbrisoles, a) S4-La Cabaña y b) S7-Vista Hermosa.

La mayor heterogeneidad y complejidad en la distribución de la apertura se presentó en S7, mientras que en S4 la distribución de la apertura fue menos heterogénea. El S7 tuvo la menor apertura del dosel y de los valores se establecieron entre 0.03 a 0.20 donde la ARD menor dominó en la mayor parte la parcela, en tanto que la mayor apertura, se estableció en la porción suroeste. El S4 presentó valores de ARD entre 0.03 a 0.27. En este caso la mayor apertura se apreció en la porción media de la parcela y hacia el noroeste, mientras que en la porción sureste y noroeste tuvieron una baja ARD (Figura 16).

La apertura relativa del dosel en el agroecosistema cafetalero sobre Luvisoles no presentó diferencias significativas entre sus valores promedio (Cuadro 13). A pesar de esto la tendencia de la luz disponible entre los sitios fue que S1 tuvo el valor promedio ligeramente más bajo que S2, aunque la variabilidad de la luz difusa fue muy grande para poder determinar las diferencias claras (Figura 16). Las distribución de la luz disponible en S1 fue que la zona de mayor apertura se estableció en la parte media y en dirección oeste, en tanto que la menor apertura se estableció en la porción este de la parcela (Figura 17). En este caso los rangos de ARD se establecen entre 0.006 a 0.14 (Figura 16). En el caso del S2 la ARD tuvo una distribución homogénea donde la tendencia fue que la apertura

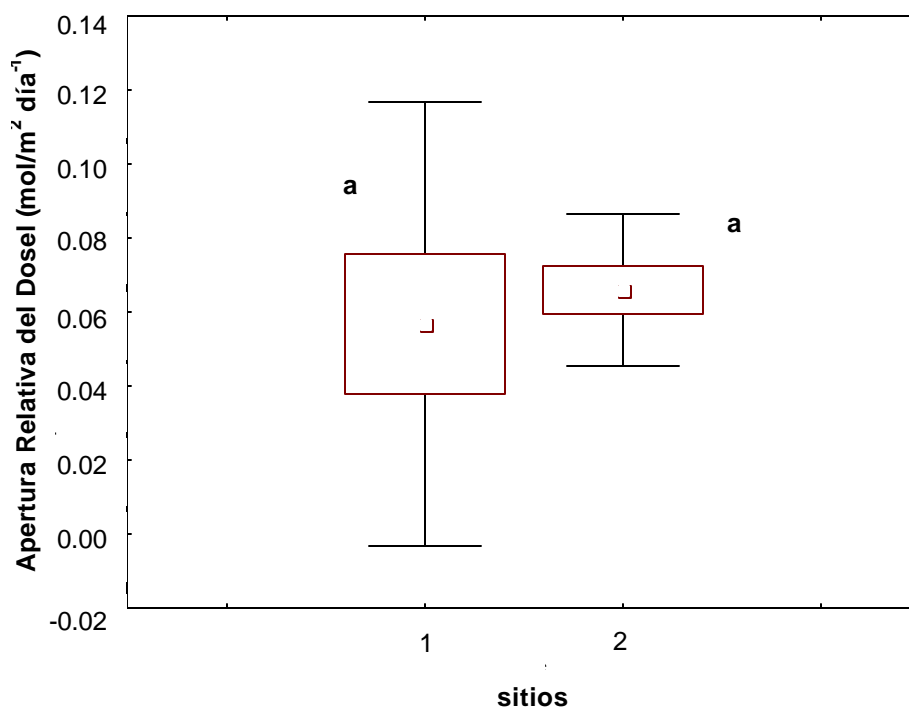
más baja se encontró en la mayor parte de la parcela (Figura 17). El rango de la ARD oscila entre 0.023 a 0.093 (Figura 16).

**Tabla 13.** Caracterización de la apertura relativa del dosel y de la producción de café en sitios sobre Luvisoles, en un agroecosistema cafetalero. Los valores promedio son de 10 muestras superficiales de suelo

Características	Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F	p
*ARD	sitio	2.9951	1	2.99	1.07	0.31
	error	44.487	16	2.78		
Productividad g.m <sup>2</sup>	sitio	0.565	1	0.565	1.07	0.31
	error	8.391	16	0.524		

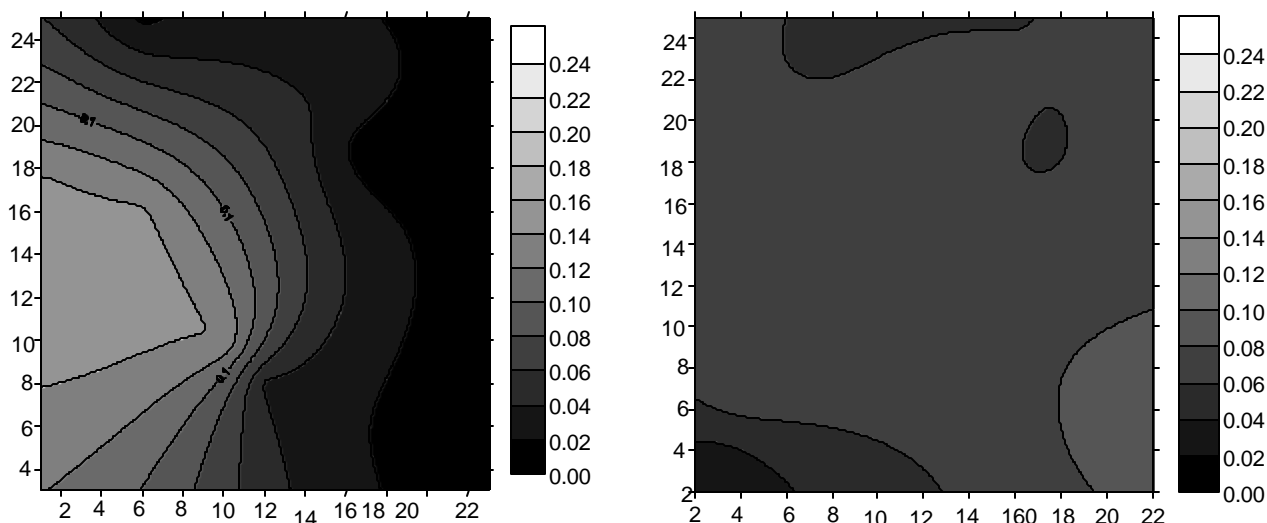
ARD- Apertura relativa del dosel

\*Datos transformados log<sub>10</sub>



**Figura 16.** Valores promedio ( $\pm$ es) de la apertura relativa del dosel del agroecosistema cafetalero sobre Luvisoles. S1=0.057 (0.019), S2=0.06 (0.006), La Cabaña.





**Figura 17.** Distribución de la apertura relativa del dosel en el agroecosistema cafetalero, en sitios sobre Luvisoles. S1 (a) y S2 (b), La Cabaña, Pluma Hidalgo.

#### 4.5 Composición florística en el agroecosistema cafetalero

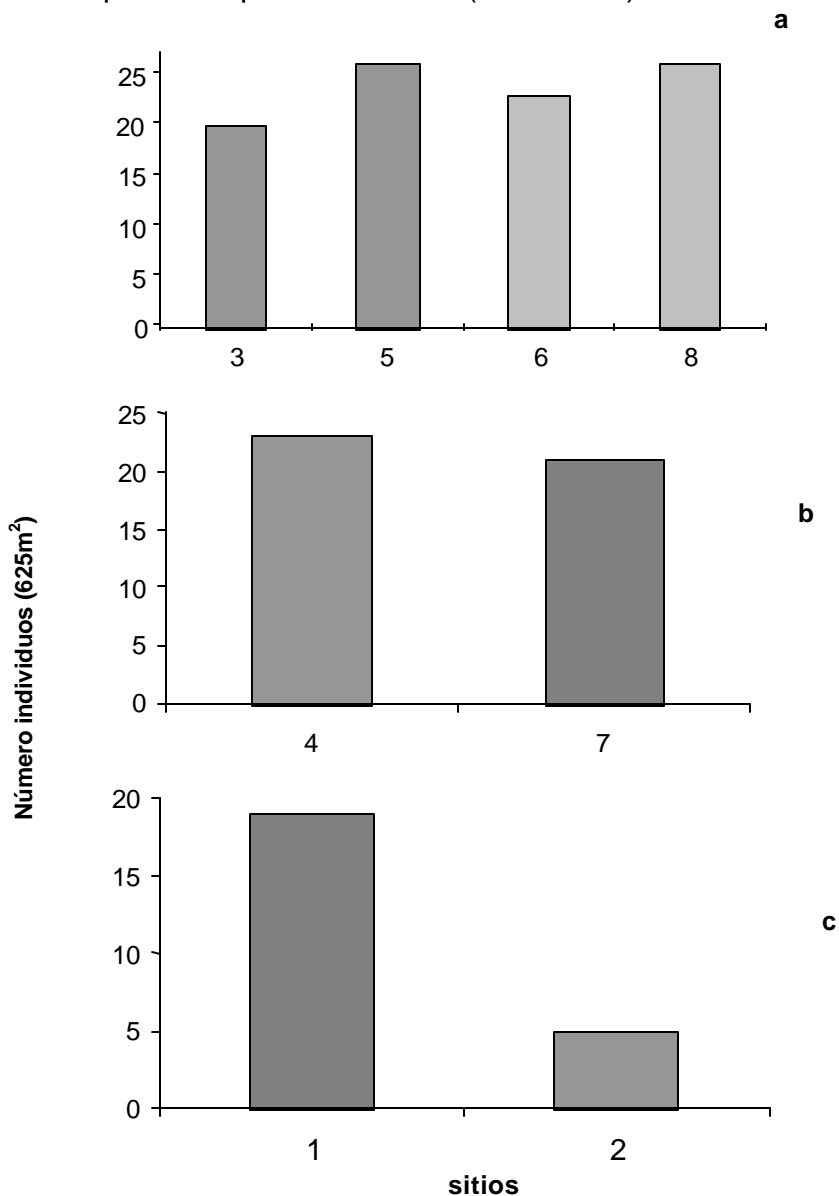
La cobertura vegetal, empleada como sombra en el cultivo de café, se encuentra compuesta por un importante número de familias vegetales. A continuación se presenta la caracterización de la vegetación para cada uno de los sitios (Figura 18).

La vegetación de los sitios caracterizados como Phaeozems presentó una composición de 96 individuos, distribuidos en 3 sitios. La menor densidad consistió de 20 individuos que se establecieron en S3 (Figura 18). El sitio 6 tuvo una densidad arbórea de 23 individuos, en tanto el S5 y S8 tuvieron la mayor densidad de árboles con 28 y 24 individuos, respectivamente (Figura 18). En cuanto a la composición S5 presentó el mayor número de familias y géneros determinados, seguidos del S8 con el mayor número de familias. En tanto, que S3 y S6 tuvieron el menor número de familias y géneros (Cuadro 14). Tomando en cuenta la ARD, el sitio 5 tuvo la menor disponibilidad de luz y el mayor número de individuos, en tanto que en S8 tuvo una densidad arbórea intermedia y mayor cantidad de luz difusa (Figuras 13 y 18). Esto puede relacionarse con la distribución de los árboles sobre todo en las porciones norte y sur de las parcelas (Figura 13).

Los sitios caracterizados como Umbrisoles presentaron una composición de 49 individuos. Estos se distribuyeron de la siguiente manera: S4 tuvo 22 individuos, S7 tuvo un total de 29 individuos (Figura 18). En cuanto a la diversidad, S4 se encontró compuesto de 13 familias, en tanto que el número de géneros se estableció en 16, mientras que S7 se

podieron identificar 9 familias y 10 géneros, aunque es importante mencionar que 3 individuos no pudieron ser identificados (Cuadro 15).

En cuanto a la composición de la vegetación en los sitios identificados como Luvisoles se encontró una densidad arbórea de 31 individuos. En este caso S1 tuvo un valor de 19 individuos, en tanto que el S2 tuvo 12 individuos (Figura 18). En cuanto a la diversidad en S2 tuvo el mayor número de familias y géneros, 7 y 8 respectivamente, y dos individuos que no pudieron ser identificados. En S1 se encontraron 8 familias, 7 géneros y 1 individuo que no se pudo identificar (Cuadro 16).



**Figura 18.** Densidad arbórea en el agroecosistema cafetalero en la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca, a) Phaeozems, S3-La cabaña; S5, S6, S8-Vista Hermosa, b) Umbrisoles, S4-La Cabaña, S7-Vista Hermosa; c) Luvisoles; S1 y S2-La Cabaña.

**Cuadro 14.** Composición florística en el agroecosistema cafetalero sobre Phaeozems

Sitio	Familia	Géneros y especies	Número de individuos
<b>Palo Piedra, La Cabaña</b>			
<b>S3</b>			
	Sapotaceae	<i>Dipholis micropholi</i>	4
	Lauraceae	<i>Nectandra sp</i>	3
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	4
	Melastomataceae	<i>Miconia donnell-smithi</i>	4
	Sapindaceae	<i>Cupania dentata</i>	3
	Solanaceae	sp1 indeterminada	1
	Rubiaceae	<i>Hemelia patens</i> Jacq.	4
<b>San Joaquín, Vista Hermosa</b>			
<b>S5</b>			
	Cumbretaceae,	Sp2 indeterminada	1
	Leguminosae	<i>Inga punctata</i> Willd	2
		<i>Inga lactibracteata,</i>	3
		<i>Inga oerstediana</i> Benth	1
		<i>Acacia farmesiana</i>	1
	Melastomataceae	<i>Miconia donnell-smithi</i>	2
	Actinidaceae	<i>Sauravia sp1</i>	9
	Clethraceae	<i>Chletra alcoceri</i>	1
	Moraceae	<i>Ficus maxima</i>	1
		<i>Pseudol media</i>	1
	Myrtaceae	<i>Eugenia aff. uniflorai</i>	1
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertoll	1
	Flacourtiaceae	<i>Casearia nitida</i>	1
	Chrysobalanaceae	<i>Licania arborea</i>	1
	Sapotaceae	<i>Dopholis micropholi</i>	1
	Annonaceae	<i>Annona sp</i>	1
<b>San Joaquín, Vista Hermosa</b>			
<b>S6</b>			
	Actinidaceae	<i>Sauravia sp</i>	8
	Leguminosae	<i>Inga oerstediana</i>	1
		<i>Inga lactibracteata</i>	4
		<i>Inga punctata</i>	2
		<i>Acacia farmesiana</i>	1
	Sapindaceae	<i>Casaria nitidas</i>	2
	Lauraceae	<i>Ocotea sinuata</i> Rohwer	2
	Rubiaceae	<i>Hemelia petens</i> Jacq	1
	Anonaceae	<i>Anona sp</i>	1
<b>Los Pocitos, Vista Hermosa</b>			
<b>S8</b>			
	Leguminosae	<i>Inga oerstediana</i> Beht	4
		<i>Albizia adinocephala</i>	1
		Britton & Rose	
	Sapotaceae	<i>Dipholis micropholi</i>	2
		<i>Sp1 indeterm</i>	1
	Meliaceae	<i>Cedrela oaxaquensis</i>	5
		C.DC & Rose	
	Clethraceae	<i>Clethra alcoceri</i>	1
	Rubiaceae	<i>Sp indeterminada</i>	1
	Llegalache	<i>Sp indeterminada</i>	2
	Capulin	<i>Sp indeterminada</i>	2
	Chamicillo	<i>Sp indeterminada</i>	1
	Actinidaceae	<i>Sauravia sp</i>	2
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertoll	2

**Cuadro 15.** Composición florística en el agroecosistema cafetalero sobre Umbrisoles

Sitios de estudio	Familias	Géneros y especies	Número de individuos
<b>Palo Piedra, La Cabaña</b>			
<b>S4</b>			
	Rutaceae	<i>Xantoxylum</i> sp	1
	Leguminosae	<i>Acacia farmesiana</i>	1
	Melastomataceae	<i>Miconia</i> sp1	1
	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp	5
	Clethraceae	<i>Clethra alcoceri</i>	1
	Actinidaceae	<i>Sauravia</i> sp1	3
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	2
	Flacourtiaceae	<i>Casearia nitida</i>	3
	Sapotaceae	<i>Dipholis micropholi</i>	1
	Rubiaceae	<i>Hemelia patens</i> Jacq	1
	Sterculiaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	1
	Solanaceae	<i>indet</i> sp1	1
	Tiliaceae	<i>Mothonodendron</i> sp	1
<b>Los Pocitos, Vista Hermosa</b>			
<b>S7</b>			
	Sapotaceae	<i>Dipholis micropholi</i>	8
	Lauraceae	<i>Nectandra</i> sp	1
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	2
	Melastomataceae	<i>Miconia</i> sp	1
	Leguminosae	<i>Inga lactibracteata</i>	1
		<i>Acacia farmesiana</i>	1
		<i>Inga oerstediana</i> Benth	2
	Clethraceae	<i>Clethra alcoceri</i>	3
	Meliaceae	<i>Cedrela oaxaquensis</i>	3
	Actinidaceae	<i>Sauravia</i> sp2	2
	Cesalpinaceae	<i>Sp indeterminada</i>	1
	Chamicillo	<i>Sp indeterminada</i>	1
	llegalache	<i>Sp indeterminada</i>	3

**Cuadro 16.** Composición florística en el agroecosistema cafetalero sobre Umbrisoles

Sitio	Familia	Géneros y especies	Número de individuos
<b>La Cañería, La Cabaña</b>			
<b>Sitio 1</b>			
	Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	7
	Sapindaceae	<i>Cupania dentata</i>	1
	Bombacaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L) Gaertn	1
	Leguminosaceae	<i>Inga latibracteata</i> Harms	2
		<i>Acacia farnesiana</i>	1
	Anonaceae	<i>Annona</i> sp	1
	Actinidaceae	<i>Sauravia</i> sp1	2
		Sp indeterminada	4
<b>La Cañería, La Cabaña</b>			
<b>S2</b>			
	Rutaceae	<i>Xanthoxylum aff caribaeum</i>	2
	Actinidaceae	<i>Sauravia</i> sp	1
	Sapindaceae	<i>Cupania dentata</i> DC	1
	Leguminosae	<i>Inga latibracteata</i> Harms	2
	Meliaceae	<i>Guarea</i> sp	1
		<i>Cedrela oaxaquensis</i> C DC. & Rose	1
		Sp indeterminada	1
		Sp indeterminada	1
	Moraceae	<i>Trophis chiapensis</i> Brandegge	1
	Sapotaceae	<i>Callophyllum</i> sp	1

#### 4.6 Productividad de cereza de café en diferentes grupos de suelo

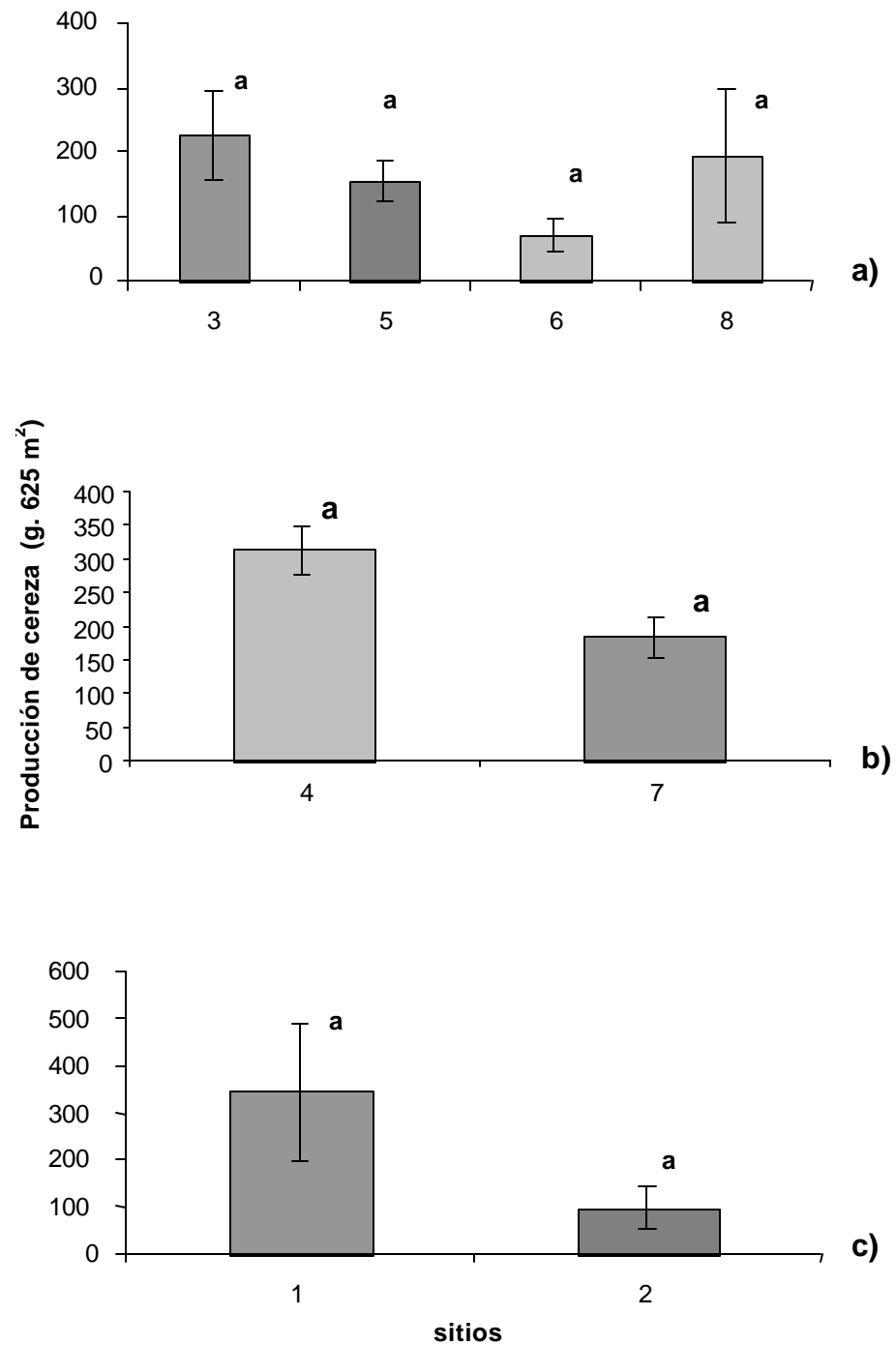
La productividad del agroecosistema cafetalero se evaluó para cada uno de los sitios de estudio. Las plantas de café fueron predominantemente *Coffea arabica* L variedad típica. La edad promedio de los cafetos fue de 15 años. Dentro del manejo de las plantas se reportaron la poda de cada mata de café, para controlar la productividad. Las estimaciones de productividad se hicieron para la superficie de 625 m<sup>2</sup> ya que las condiciones de producción en los sitios estudiados fueron heterogéneas.

En los sitios sobre Phaeozems, la productividad no presentó diferencias significativas entre los valores promedio de los sitios ( $F_{(3,36)}=23.3$ ;  $p=0.094$ ; Cuadro 11); aunque es importante evidenciar la diferencia residual entre los sitios así como la alta variabilidad de producción de café dentro de cada sitio. La tendencia para esta unidad de suelo fue que S6 y S5 tuvieron el valor promedio más bajo (6.8 y 153.4 g m<sup>2</sup>), en tanto que los sitios con mayor producción promedio de café fueron S3 y S8, con valores promedio de 225.7 y 193.6 g m<sup>2</sup> (Figura 16). Analizando la producción sobre Phaeozem la tendencia fue que S5 tuvo la menor producción de café en condiciones bajas de ARD y una alta

densidad arbórea, en tanto que S8 tuvo la mayor productividad de café, la mayor ARD y una densidad arbórea intermedia. En cuanto a un sitio contrastante se consideró a S6, suelo con mayor desarrollo genético, que tuvo la menor productividad, una de las mayores ADR y unos de la densidades arbóreas mas bajas (Figuras 12, 18 y 19). En general, el comportamiento de los datos de la productividad entre los S3, S5, S6 y S8 tuvo una enorme variación por lo que las diferencias significativas no fueron claras (Figura 19).

La producción de café en los Umbrisoles no presentó diferencias significativas entre los sitios ( $F_{(3,28)}=23.3$ ,  $p<0.09$ ; Tabla 8), aunque es importante considerar la diferencia residual entre los sitios. Esta tendencia poco acentuada se debe a la variación en la producción de cada planta relacionada con la edad y por la poda de las ramas. De manera general, el S4 tuvo una producción de  $312.4 \text{ g m}^{-2}$  en tanto que el S7 tuvo una productividad de  $182 \text{ g } 625 \text{ m}^{-2}$  (Figura 19). Para este caso hubo una tendencia donde S4 tuvo la mayor producción bajo condiciones de mayor ADR y un menor número de individuos arbóreos (Figura 14, 18 y 19).

La producción de café de los sitios caracterizados como Luvisoles no presentó diferencias significativas ( $F_{(1,16)}= 107$ ,  $p=0.31$ ). La tendencia de la producción fue que S2 tuvo el valor promedio más bajo con  $98.4 \text{ g } 625 \text{ m}^{-2}$ , mientras que S1 tuvo el valor promedio más alto de producción de cereza de café ( $344.4 \text{ g } 625\text{m}^{-2}$ ; Figura 19). En este caso la mayor producción de S1 se relacionó con las condiciones de sitio de menor ARD y un mayor número de individuos arbóreos (Figuras 16, 18 y 19).



**Figura 19.** Valor promedio de la productividad de cereza de café en el agroecosistema cafetalero de la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca, a) Productividad en Phaeozems S3=225.7 g ( $\pm$ 68.7), la Cabaña, S5=153.3 g ( $\pm$ 30.9), S6=6.8 g ( $\pm$ 26) y S8=193.65 g ( $\pm$ 102.9), Vista Hermosa; b) Productividad en Umbrisoles S4= 312.4g, La Cabaña y S7=182 g, Vista Hermosa; c) Productividad en Luvisoles, en el agroecosistema cafetalero a la sombra, en la finca la Cabaña, Pluma Hidalgo. S1 y S2 predio la Cañería. Las letras en negritas corresponden a las diferencias significativas entre sitios

#### **4.7 Relaciones entre las variables edáficas y las condiciones de apertura del dosel**

Las relaciones entre las diferentes variables evaluadas en el agroecosistema cafetalero se determinaron mediante el análisis de correlación del momento de Pearson. Dentro de las relaciones consideradas se encuentran la variación de las propiedades edáficas en el horizonte superficial con la apertura relativa del dosel (Cuadros 17, 18 y 19). Los Phaeozems tuvieron mayor correlación entre las variaciones de sus propiedades con las condiciones del dosel (ARD). En tanto que los Umbrisoles y Luvisoles, las relaciones entre las variables edáficas y del dosel no fueron claras ya que no se observaron relaciones en Umbrisoles, en tanto que para Luvisoles las relaciones con el dosel fueron pocas (Figura 20).

Las relaciones analizadas entre la ARD y las variables edáficas en cada grupo de suelos, evidenciaron que para el caso de los Phaeozems hubo una correlación negativa con el pH (H<sub>2</sub>O y KCl), Nt y C/N ( $p > 0.5$ ; Cuadro 17). Los coeficientes de correlación se establecieron entre -0.403 a -0.126. (Cuadro 17 y Figura 20). Otra correlación significativa se presentó entre la ARD y P<sub>disponible</sub>, en este caso la correlación fue positiva, aunque es importante mencionar en este caso la dinámica de fósforo se caracterizó por una alta dispersión de los datos. El análisis de sitio, en este grupo de suelos, evidenció importantes variaciones de las propiedades físicas y químicas, en su horizonte superficial, diferencia en la ARD y diferencias en la abundancia de especies. En este caso las diferencias se establecieron entre S5 y S8 los cuales fueron suelos con un menor desarrollo morfológico (Cuadro 2 y 3). Las condiciones de sitio en S5 fueron una menor ARD, mayor densidad de árboles, bajo pH, Nt y débil mineralización (C/N). En tanto que en S8 se presentaron condiciones de mayor apertura, menor densidad arbórea; bajo pH, Nt, y débil mineralización de la MOS (C/N). Aunque la tasa de mineralización de la materia orgánica fue más rápida en el sitio con mayores aperturas (S8). Esto mostró que los Phaeozems tiene una mayor respuesta a los cambios en los diferentes componentes del agroecosistema.



**Cuadro 17.** Análisis de correlación del momento de Pearson ( $p < 0.05$ ) entre las características edáficas y la apertura relativa del dosel en sitios sobre Phaeozems, en un agroecosistema cafetalero. Los números en negritas presentan las correlaciones significativas

Variables	R	p
<b>*ARD</b>		
Resistividad	0.19	0.22
Humedad	-0.18	0.24
pH H <sub>2</sub> O	<b>-0.32</b>	<b>0.04</b>
pH KCl	<b>-0.40</b>	<b>0.01</b>
<b>**COS</b>	0.05	0.71
Nt	<b>-0.34</b>	<b>0.03</b>
N <sub>mineralizable</sub>	-0.24	<0.05
C/N	<b>-0.12</b>	<b>0.03</b>
<b>**Pdisponible</b>	<b>0.38</b>	<b>0.01</b>
K <sup>+</sup>	-0.22	0.16
Ca <sup>2+</sup>	-0.17	0.27
Mg <sup>2+</sup>	-0.23	0.14

Datos transformados a  $\ln$  y  $\log_{10}$

En el caso de los Umbrisoles, las correlaciones fueron muy bajas entre la ARD y las variables edáficas ya que se establecieron entre 0.3 a -0.4. La mayor parte las relaciones fueron negativas, aunque no significativas (Cuadro 18). Las diferencias entre los sitios fueron evidentes tanto en el desarrollo morfológico del suelo como en las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial. La tendencia fue que S4, con respecto de S7, tuvo una ADR ligeramente mayor, tuvo baja densidad arbórea, baja concentraciones de humedad, baja resistividad, baja concentración de carbono, nitrógeno, N<sub>mineralizable</sub> y una débil mineralización de MOS (C/N) y baja concentración de potasio (Cuadro 6). En este caso la velocidad de mineralización de la materia orgánica fue heterogénea en diferentes condiciones de apertura aunque el patrón de mineralización se mantuvo entre las diferentes épocas del año.

**Cuadro 18.** Análisis de correlación del momento de Pearson ( $p < 0.05$ ) entre las características edáficas y la apertura del dosel en sitios sobre Umbrisoles, en un agroecosistema cafetalero. Los números en negrita representan correlaciones significativas.

Variables	R	P
<b>*ARD</b>		
Resistividad	-0.01	0.96
Humedad	0.31	0.28
pH H <sub>2</sub> O	-0.41	0.14
pH KCl	-0.26	0.37
<b>**COS</b>	0.18	0.58
Nt	-0.03	0.91
C/N	0.25	0.39
N <sub>mineralizable</sub>	0.18	0.63
<b>**P<sub>disponible</sub></b>	0.28	0.32
K <sup>+</sup>	0.42	0.13
Ca <sup>2+</sup>	-0.16	0.58
Mg <sup>2+</sup>	0.18	0.62

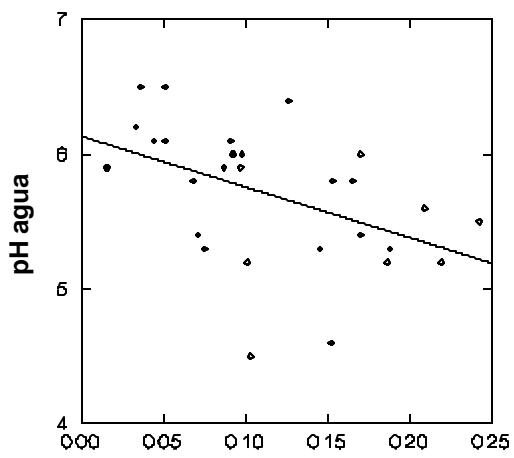
Datos transformados a **\*\*ln** y **\*log<sub>10</sub>**

**Cuadro 19.** Análisis de correlación del momento de Pearson ( $p < 0.05$ ) entre las características edáficas y la apertura del dosel en sitios con suelo caracterizado como Luvisoles en un agroecosistema cafetalero. Los números en negrita representan correlaciones significativas.

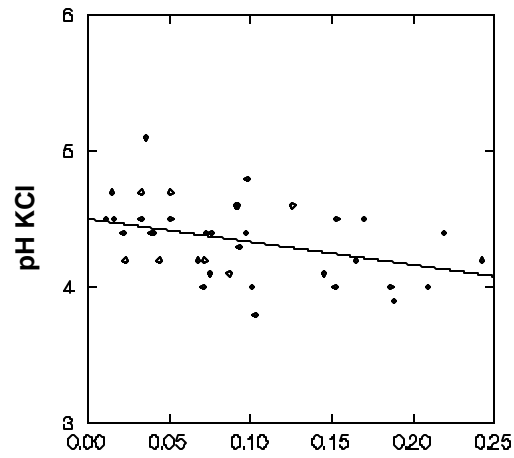
Variables	R	p
<b>*ARD</b>		
Resistividad	-0.22	0.37
Humedad	-0.09	0.69
pH H <sub>2</sub> O	0.34	0.15
pH KCl	0.16	0.51
COS	0.06	0.81
Nt	<b>-0.51</b>	<b>0.03</b>
C/N	0.30	0.21
N <sub>mineralizable</sub>	-0.26	0.38
P <sub>disponible</sub>	0.19	0.43
K <sup>+</sup>	-0.29	0.23
Ca <sup>2+</sup>	-0.26	0.28
Mg <sup>2+</sup>	-0.20	0.42

Datos transformados a **\*\*ln** y **\*log<sub>10</sub>**

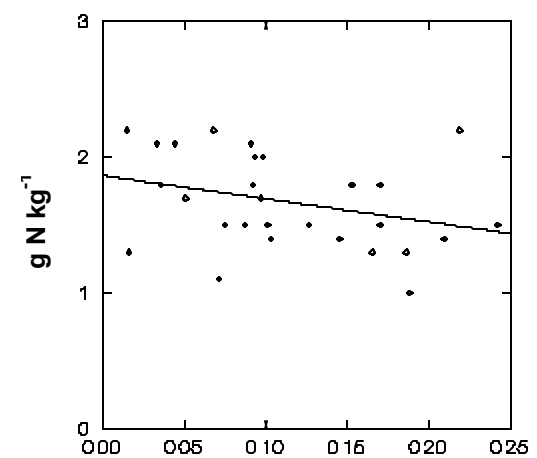
En los Luvisoles, de acuerdo con el análisis de correlación entre las variables edáficas y la apertura relativa, hubo pocas relaciones. Las condiciones del dosel se correlacionaron sólo con la concentración de Nt, de manera positiva. El resto de correlaciones fueron negativas (Cuadro 19), exceptuando con pH, COS, C/N aunque estas fueron no significativas. Los coeficientes de correlación se establecieron entre 0.3 a -0.22 (Cuadro 19 y Figura 20). El análisis de sitio mostró que hubieron diferencias entre los sitios de estudio las cuales estuvieron dadas por la resistividad, el calcio y magnesio. Además de que se pudo apreciar que las diferencias también se establecieron en el desarrollo del suelo ya que ambos sitios presentaron suelos complejos, sobre todo en el caso de S2. En cuanto a las condiciones de sitio se observó que a pesar de que no hubo diferencias en las condiciones del dosel la tendencia fue que S2 tuvo una ADR ligeramente mayor, menor densidad arbórea y alta diversidad; tuvo un concentración de Nt ligeramente mayor, una menor resistividad y mayor contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . En cuanto a la velocidad de mineralización de materia orgánica tuvo baja heterogeneidad bajo diferentes condiciones de apertura y los patrones de las tasa tendieron a mantenerse entre la épocas de secas y de humedad.



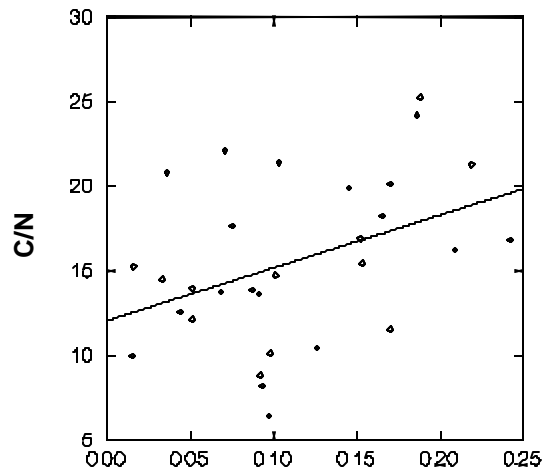
a)



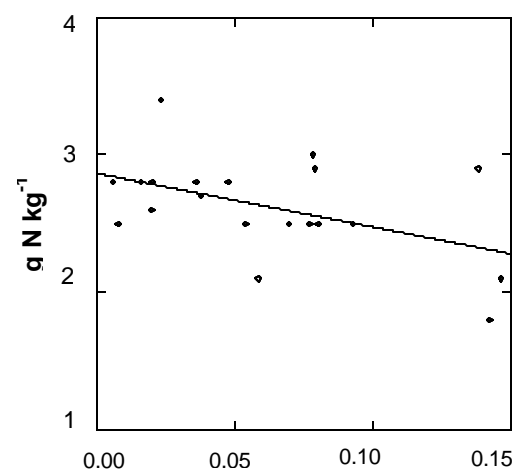
b)



c)



d) Apertura Relativa del Dosel



e) Apertura relativa del dosel

**Figura 20.** Gráficas de correlación entre la apertura relativa del dosel (ARD) y variables edáficas en dos grupos de suelo, a, b, c y d) Phaeozems; e) Luvisoles.

#### 4.8 Relaciones entre la productividad, las propiedades edáficas y apertura de dosel

La productividad de los cafetales tuvo relaciones significativas con los valores promedio de las propiedades de los diferentes grupos de suelo y con las condiciones de apertura del dosel (Cuadro 20, 21 y 22). El mayor número de correlaciones se establecieron en los Phaeozems, en tanto que para los Umbrisoles y Luvisoles estas fueron menores. Es importante mencionar que las correlaciones tuvieron baja asociación pero estas fueron significativas. A continuación se muestra el análisis de correlación del momento de Pearson para cada grupo de suelo (Cuadros 20, 21 y 22 y Figura 21).

La productividad promedio, de los suelos considerados como Phaeozems, se correlacionó significativamente ( $p < 0.05$ ) con la ARD y con algunas variables edáficas. La productividad promedio estuvo correlacionada negativamente con la ARD. En este caso se apreciaron diferencias significativas entre las condiciones de apertura y fueron establecidas por S5 y S8 (Figura 9). En el caso de la productividad no presento diferencias significativas aunque la tendencia fue que los sitios 5 y 6 tuvieron la menor productividad y S3 y S8 la mayor productividad. En el caso de las propiedades del suelo, la productividad media se relacionó negativamente con la resistividad y de forma positiva con pH, Nt y Mg (Cuadro 20). Los coeficientes de correlación se establecieron entre 0.06 a 0.43. El análisis de varianza mostró diferencias entre las propiedades de los suelos dentro de los sitios. En cuanto a las condiciones donde se desarrolla el café considerando las variables correlacionadas se observó que el suelo se encuentra creciendo sobre un gradiente de resistividad de 27.5 a 99.9  $\text{g kg}^{-1}$ , pH entre 5.1 a 6.0, en tanto que la concentración de nitrógeno fue de 1.4 a 1.9  $\text{g kg}^{-1}$  y el magnesio se estableció entre 0.89 a 3.1  $\text{cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$  (Cuadro 3).

En el caso de la productividad de los sitios caracterizados como Umbrisoles la relación entre la productividad, el dosel y las variables edáficas fue muy baja. De manera general, la productividad presentó correlación significativa ( $p < 0.05$ )  $\text{Ca}^{2+}$ , de forma negativa y una correlación residual negativa con la humedad, donde los coeficientes fueron de -0.54 y -0.42. En tanto que el resto de las variables tuvieron un coeficiente de correlación bajo que se estableció entre 0.03 a 0.42, aunque estas fueron no significativas (Cuadro 21). El análisis de productividad mostró una tendencia de mayor producción de cereza del café en S4 que en S7, cuyas condiciones del dosel fueron ligeramente más abiertas en S4 que en S7. También se observó en el análisis de sitio que se establecieron

diferencias entre los sitios con respecto a sus variables físicas y químicas, en este caso para las variables correlacionadas con productividad se observa que S4 tuvo una mayor humedad y menor contenido de calcio (Cuadro 6).

**Cuadro 20.** Resultados del análisis de correlación entre la productividad y las variables edáficas y ARD en sitios bajo Phaeozems en un agroecosistema cafetalero. Los números en negrita representan correlaciones significativas

<b>Variables</b>	<b>r</b>	<b>p</b>
<b>*Productividad</b>		
*ARD	<b>-0.41</b>	<b>0.008</b>
*Resistividad	<b>-0.43</b>	<b>0.006</b>
Humedad	nd	nd
pH H <sub>2</sub> O	0.27	0.091
pH KCl	<b>0.36</b>	<b>0.02</b>
**COS	0.06	0.67
Nt	<b>0.37</b>	<b>0.01</b>
*N <sub>mineralizable</sub>	0.35	>0.05
C/N	-0.23	0.13
*P <sub>disponible</sub>	- 0.28	0.07
K <sup>+</sup>	0.18	0.26
Ca <sup>2+</sup>	0.23	0.13
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.30</b>	<b>0.05</b>

\*Valores transformados \*log<sub>10</sub>, \*\*ln

Las relaciones de la productividad del agroecosistema cafetalero, sobre Luvisoles, con la apertura relativa del dosel y con las propiedades físicas y químicas del suelo se observan en el Cuadro 20. En este caso los coeficientes de correlación entre las variables se establecieron entre 0.07 a -0.59. La tendencia de la producción de cereza de café se encuentra asociada a algunos atributos del agroecosistema como la resistividad del suelo y COS, donde las correlaciones fueron de tipo negativa y positiva, respectivamente. Es importante mencionar que la productividad tuvo una correlación residual ( $p=0.06$  y  $0.059$ ) con la apertura relativa del dosel y la relación C/N donde las correlaciones fueron de tipo positiva y sus coeficientes de correlación se establecieron  $0.44$  y  $0.45$ . El análisis de sitio mostró que en hubieron diferencias entre los sitios relacionados con la resistividad, calcio y magnesio (Cuadro 8), en tanto que las condiciones de apertura entre los sitios no fueron contrastantes (Figura 16) aunque la distribución de la luz disponible, dentro de los sitios, fue gradual. Considerando las variables correlacionadas se observó que el café se encuentra desarrollándose en un gradiente de condiciones edáficas donde la resistividad se establece entre  $25.8$  a  $34.5 \text{ g kg}^{-1}$ , el COS se estableció entre  $38.4$  a  $38.9 \text{ g kg}^{-1}$ , la C/N  $14.5$  a  $15.9$ .

**Cuadro 21.** Resultados del análisis de correlación entre la productividad y las variables edáficas y ARD, en sitios sobre Umbrisoles, en un agroecosistema cafetalero. Los números en negrita representan correlaciones significativas

Variables	r	p
<b>*Productividad</b>		
ARD	0.15	0.89
Resistividad	-0.47	0.75
Humedad	-0.42	0.07
pH H <sub>2</sub> O	0.03	0.61
pH KCl	0.19	0.12
**COS	0.27	0.86
Nt	0.03	0.61
N <sub>eralizable</sub>	0.13	>0.05
C/N	-0.15	0.87
*P <sub>disponible</sub>	-0.30	0.21
K	-0.41	0.19
Ca <sup>2+</sup>	<b>-0.54</b>	<b>&lt; 0.05</b>
Mg <sup>2+</sup>	-0.34	>0.05

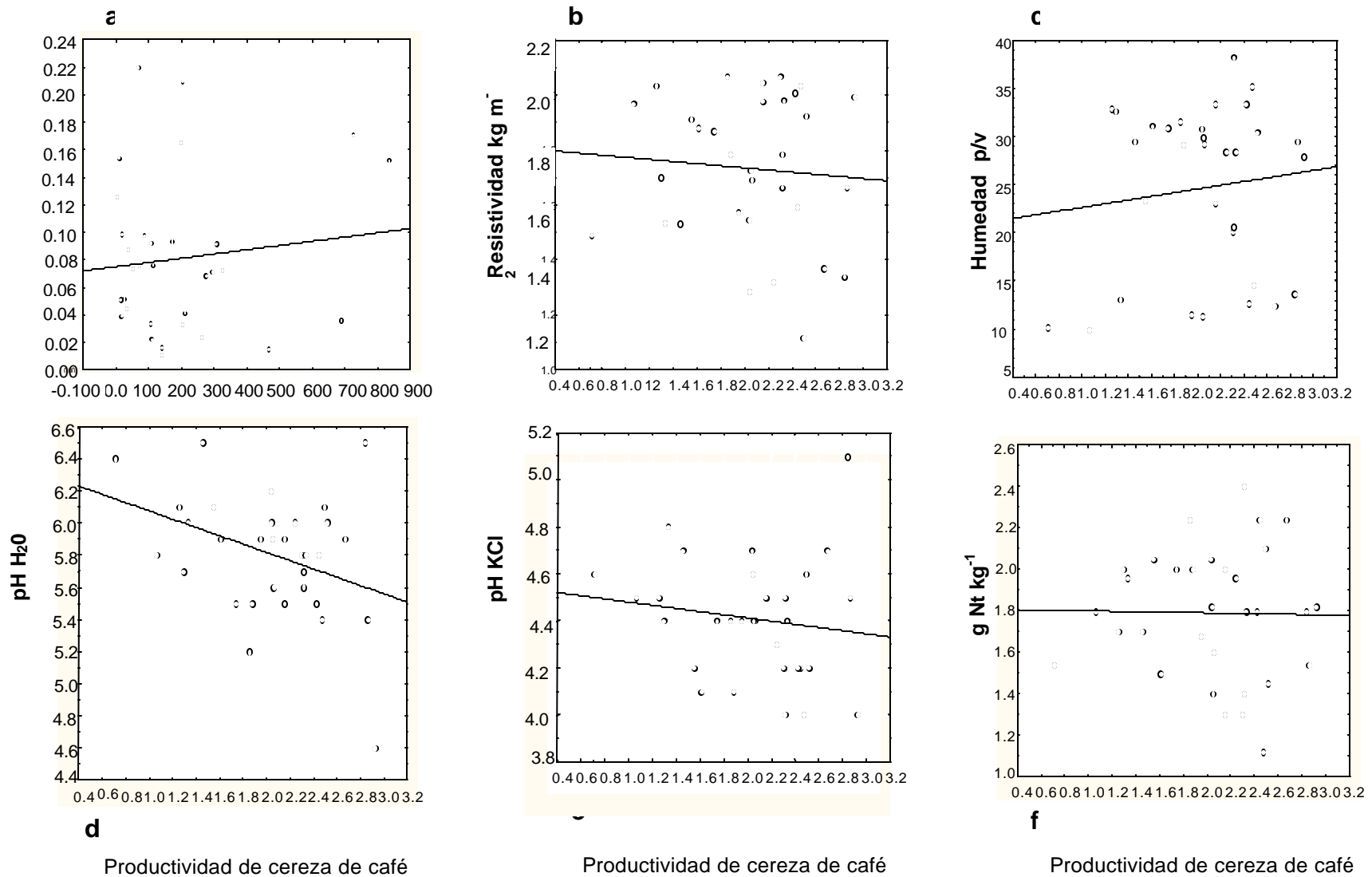
\*Valores transformados  $\log_{10}$ , \*\*ln

**Cuadro 22.** Resultados del análisis de correlación entre la productividad, las variables edáficas y la ARD en sitios bajo Luvisoles en un agroecosistema cafetalero. Los valores en negritas muestran las correlaciones significativas

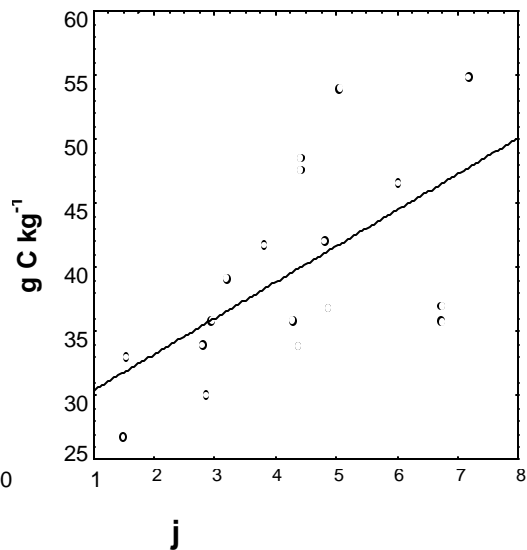
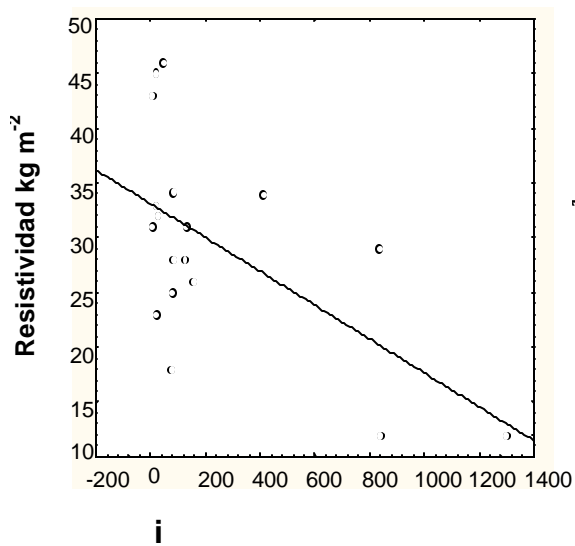
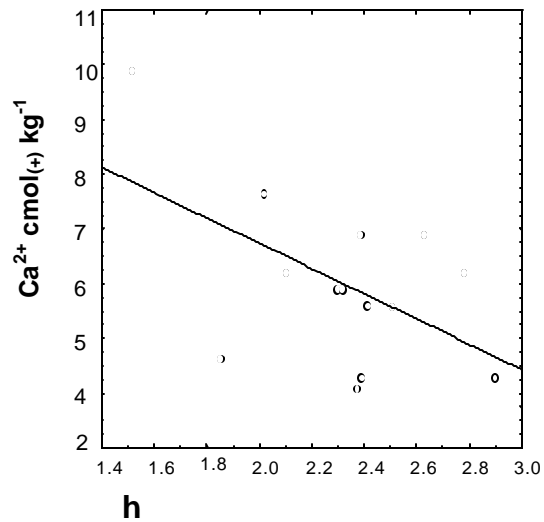
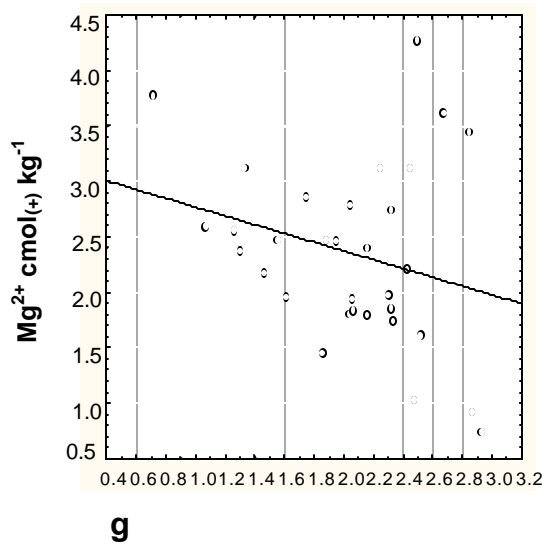
Variables	r	P
*Productividad		
*ARD	0.44	0.06
Resistividad	<b>-0.58</b>	<b>0.01</b>
*Humedad	-0.09	0.75
pH H <sub>2</sub> O	-0.18	0.46
pH KCl	-0.28	0.25
COS	<b>0.59</b>	<b>0.009</b>
Nt	0.23	0.35
N <sub>mineralizable</sub>	0.40	0.70
C/N	0.45	0.059
*P <sub>disponible</sub>	0.26	0.41
K <sup>+</sup>	0.07	0.77
Ca <sup>2+</sup>	0.07	0.76
Mg <sup>2+</sup>	0.27	0.26

\*Valores transformados \*log<sub>10</sub>, \*\*ln





**Figura 21.** Gráficas de correlación entre productividad de cereza de café (en  $625 \text{ m}^2$ ), apertura relativa del dosel y las propiedades del suelo en Phaeozems.



**Figura 21 continuación.** Gráficas de correlación entre productividad de cereza de café, apertura relativa del dosel y variables del suelo en el agroecosistema cafetalero, g) Phaeozems, h) Umbrisoles, i y j) Luvisoles.

## CAPITULO 5

### DISCUSIÓN

Las condiciones del agroecosistema cafetalero de la comunidad de Pluma Hidalgo, Oaxaca, son consideradas como muy complejas. De manera general se observó que el suelo tuvo una respuesta a la apertura del dosel. En el caso de la productividad del café, los cambios se debieron a las condiciones de las propiedades del suelo más que a la apertura del dosel. Aunque es importante mencionar que las relaciones entre el suelo, la apertura y la producción fueron muy bajas y numerosas variables analizadas no mostraron correlaciones significativas. La caracterización del agroecosistema evidenció que los suelos con mayor actividad productiva fueron los Phaeozems, Umbrisoles y Luvisoles, donde los Umbrisoles tuvieron el mejor rendimiento en productividad. Los suelos presentaron diferente grado de desarrollo, aunque la característica que los asocia, en la productividad, fueron los horizontes superficiales profundos, con una alta acumulación de materia orgánica.

En cuanto a la cobertura vegetal los sitios tuvieron una diversificada composición de especies donde las principales familias encontradas fueron Lauraceae, Leguminosae, Cecropiaceae, Actinidaceae, Sapotaceae. Este sistema de producción es conocida como en jardín donde los árboles de diversas comunidades vegetales son empleadas como sombra y el sotobosque es remplazado por los arbusto de café (Moguel y Toledo, 1996). En este caso los sitios con un mayor número de individuos (S5 y S6) donde predominaron Leguminosas y Actinidaceas (*Sauravia* spp). En el caso del resto de los sitios presentaron una menor composición de especies donde en S3 y S8 se encontró con mayor perturbación, reflejada en la presencia de especies secundarias (Cecropias, Melastomataceas y algunas otras especies no identificadas) referidas como sin utilidad para la sombra del café, de acuerdo con los trabajadores de la finca (com pers). En el caso de los Umbrisoles el número de individuos fue similar, entre los sitios, aunque la composición varió ya que S7 presentó un mayor número de especies secundarias; así como la mayor presencia de Leguminosas. Finalmente, los Luvisoles tuvieron diferencias marcadas en cuanto al número de especies arbóreas, con un mayor número de individuos

y de familias en S1. Las principales familias en los sitios sobre Luvisoles fueron Leguminosas, Sapotaceas, Cecropiaceas y Lauraceas (Cuadros 13, 14 y 15). Esta diversidad podría contribuir a una amplia fuente de elemento al suelo (Romero-Alvarado, 2002). En tanto que las especies encontradas son autóctonas de este tipo de vegetación.

Las condiciones del dosel presentaron una baja apertura y una baja disponibilidad de luz en el sotobosque debido a la influencia de la cobertura arbórea y de los cafetos. Las condiciones de apertura fueron bajas debido a que se establecieron entre 0.057 a 0.15 mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>, considerando al valor de 1 (mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>) como la máxima apertura. Además se observó un gradiente de luz disponible dentro de los sitios que favorece la formación de micrositios (Figuras 13, 14 y 15). Esto puede relacionarse con un bajo impacto antrópico (selección de especies de sombra y poda de los árboles) o natural (defoliación por huracanes y tormentas tropicales) del dosel, ya que se ha observado que en comunidades vegetales poco manejadas se pueden presentar valores de apertura bajos de hasta 0.15 mol/m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> (Ricker *et al.*, 1999), en tanto que en los cafetales con sombra se da una reducción de la vegetación de tan sólo 15% (Romero-Alvarado *et al.*, 2002) contrariamente la apertura del dosel puede ser alta de hasta 80% (Scatena y Larsen, 1991).

De manera general se observó que los agroecosistemas cafetaleros se establecieron sobre un mosaico de suelos y sobre un sistema de laderas con inclinación abrupta que influyó la formación de los suelos, ya que se encontraron, en algunos perfiles, una secuencia de suelos enterrados; así como diferente proceso de desarrollo genético en los diferentes grupos de suelo. La alta diversidad de suelos ha sido descrita dentro de los sistemas montañosos y se ha visto que bajo estas condiciones los procesos geomorfológicos influyen de manera importante la formación del suelo (Krasilnikov *et al.*, 2005, Birkeland, 1999) donde la pérdida del suelo domina y donde los suelos se encuentran formándose en materiales coluviales frescos o superficies erosionadas frescas (Feldman *et al.*, 1991). En este caso los suelos se encontraron desarrollando sobre gneiss y sobre una corteza de intemperismo ricas en feldespatos (García-Calderón, 2000, INEGI, 1997b). Otro proceso importante fue la presencia de rasgos genéticos avanzados, en la mayoría de los perfiles del suelo, como la presencia de un horizonte subsuperficial árgico y cambico; además de la presencia de un horizonte superficial profundo con una alta acumulación de materia orgánica. Esto evidencia la estabilidad de los sitios ya que ha habido tiempo suficiente para que se expresen rasgos diagnósticos en el suelo, que son el

resultado de los diferentes procesos físicos y químicos, siendo los procesos como el lavado, mineralización, humificación y el intemperismo los que interviene de manera importante en la evolución del suelo (García-Calderón *et al.*, 2005; Krasilnikov *et al.*, 2005; García Calderón *et al.*, 2006). Esto conlleva a una dinámica inusual de estabilidad y que se encuentra relacionado con los procesos descritos en la Sierra Sur de Oaxaca, donde los procesos geomorfológicos, que permiten la diversidad de características del suelo, es considerada como un atributo positivo en el paisaje (Krasilnikov *et al.*, 2005). Esto se debe que en general, se considera que los suelos de ladera son sitios de pérdida de materiales con suelos poco desarrollados (Van Breemen y Buurman, 1998; Gerrard, 1992; Dalrymple 1968 en Siebe *et al.*, 1996).

Los suelos encontrados tienen diferente grado de desarrollo morfológico donde en el caso de los Phaeozems (S3, S5, S6 y S8) presentan horizontes superficiales móllicos asociados a horizontes subsuperficiales árgicos considerados como suelos más desarrollados (S3 y S6), en tanto que los suelos menos desarrollados no presentan endopedón diagnóstico (S5 y S8). En el caso de los Umbrisoles (S4 y S7), presentan un horizonte superficial caracterizado como úmbrico profundo el cual se encuentra asociado a un endopedión cámbico, para el caso del suelo más desarrollado (S4), y sin endopedión diagnóstico, para el suelos con desarrollo incipiente (S7). Finalmente, en el caso de los Luvisoles son los suelos más desarrollados dentro de los sitios de estudio (S1 y S2), se encuentran compuestos por un epipedón ócrico profundo asociado a un endopedón árgico. La dinámica en los suelos en el agroecosistema cafetalero fue el establecimiento de tres secuencias de horizontes. La primera secuencia se encuentra compuesta por A (AC) y C donde se encuentran Phaeozems y Umbrisoles. Estos grupos fueron considerados como suelos de desarrollo incipiente desarrollo, sobre todo en Umbrisoles ya que son considerados suelos jóvenes. Esto se relacionó con la presencia del horizonte Umbriso cuyo color fue oscuro y con un menor grado de desarrollo que el mólico; así como una saturación de bases menor de 50% y porque se desarrollo directamente sobre el horizonte C (García-Calderón, 2006; Driessen, 2001). La segunda secuencia se encuentra compuesta por los horizontes A (AB), Bw (2Bw, 3Bw, 4Bw) y C, lo que evidencia un desarrollo del suelo intermedio. Este se debe a los procesos de relativa alteración del horizonte subyacente que proporciona el cambio del color del horizonte subsuperficial y s presenta una estructura incipiente (Driessen, 2001). Dentro de esta secuencia se establecieron algunos Phaeozems y Umbrisoles. La última secuencia se encontró

compuesta de los horizontes A (AB), Bt (Bt1, Bt2, 2Btb) y C (BC) evidenciando el mayor grado de desarrollo del suelo. Esto se asocia a un rasgo textural marcado en el perfil causado por la iluviación de arcillas; este rasgo se expresa por la formación de películas de arcillas en la cara de los agregados y poros (Driessen, 2001). En esta secuencia se establecieron los Luvisoles que, además, cuentan con un carácter policíclico, ya que se comprobó una secuencia de horizontes enterrados. Esto indica una actividad edafomorfológica alta debido al movimiento de materiales. Este proceso se encuentra reportado en la zona, donde la variabilidad del material parental y del suelo se debe a movimientos en masa a lo largo de la pendiente (García-Calderón *et al.*, 2006; Krasilnikov *et al.*, 2005). Esto se asocia a eventos naturales como una alta actividad sísmica y a los huracanes que tienen una alta incidencia lo que provoca la inestabilidad de los materiales (Clasificación Sísmica Mexicana, 2000; CONABIO, 2000; Musk, 1992).

Las características morfológicas, físicas y químicas de los Phaeozems y Umbrisoles les ha proporcionado la mayor importancia en el sistema de producción del agroecosistema cafetalero. Los Phaeozems y Umbrisoles presentaron un profundo desarrollo radicular, ya que tienen buena estructura (granular y subangular) y consistencia, un horizonte profundo de acumulación de materia orgánica. Desde el punto de vista químico, tuvieron una reacción del suelo ácida; aunque con una textura más pesada que la recomendada para la producción de café, donde las condiciones arenosas permiten el mayor recirculamiento del oxígeno para las plantas (Ramos *et al.*, 1982). Para el caso de los Luvisoles, que tienen un menor manejo productivo, presentan un horizonte superficial ócrico profundo por lo que presentan una menor acumulación de materia orgánica en el horizonte superficial, desarrollo radicular profundo, con estructura más desarrollada y gruesa (bloques subangulares medianos y grandes) y textura más pesada, que la de los Phaeozems y Umbrisoles, y una reacción del suelo ácida. La productividad de estos suelos se asocia a la presencia de un horizonte de acumulación de materia orgánica profundo, que forman parte de su reserva de nutrientes y que mantiene la fertilidad en suelos tropicales (Maass y García-Oliva, 1990, Driessen *et al.*, 2001).

El análisis de sitio mostró un mosaico de condiciones del suelo dentro de los diferentes grupos de suelos lo cual muestra un complejo sistema de micrositos. Esta heterogeneidad de condiciones tuvo mayor evidencia en los Phaeozems y Umbrisoles ya que entre los cuatro sitios analizados se presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre sus variables edáficas. En tanto que en los Luvisoles las condiciones entre los sitios

analizados mostraron menores diferencias en sus propiedades físicas y químicas. La formación de microsistios puede relacionarse con las condiciones de los otros elementos como el relieve y la cobertura vegetal. Se ha observado que la mayor diversidad vegetal (fuentes de residuos orgánicos) provoca una mayor variabilidad de materiales biodegradables, así como diferentes condiciones microambientales que modulan la tasa de mineralización de la materia orgánica, y que de manera indirecta, influyen la dinámica nutrimental y pH del suelo (Masciandaro *et al.*, 1998; Saikh *et al.*, 1998). Otro elemento importante de la variabilidad de los sitios es la estabilidad del suelo y de manera particular de la materia orgánica que depende de la formación de complejos organominerales y de formas complejas de carbono (sustancias húmicas) (Porta *et al.* 2003). El análisis de los resultados mostró que los horizontes superficiales en Phaeozems tienen diferencias, entre sitios, con respecto a la resistividad, humedad, pH, nitrógeno total, C/N y bases intercambiables (Cuadro 2); mientras que para los Umbrisoles las diferencias fueron entre la humedad, pH, nitrógeno total, potasio intercambiable y nitrógeno potencialmente mineralizable (Cuadro 5). En tanto que los Luvisoles con menores diferencias entre los sitios, aunque se establecieron diferencias en la resistividad, calcio, magnesio, y de manera residual con el nitrógeno potencialmente mineralizable (Cuadro 8). En este caso las grado de diferenciación entre grupos de suelos se debe a la presencia de los horizontes mólicos (Phaeozems) y úmbrico (Umbrisoles) y ócrico (Luvisoles) más que por la fracción mineral, ya que en los sitios se han encontrado arcillas poco activas dominadas por caolinita y de gibbsita (García-Calderón *et al.*, 2006). En particular, sus diferencias se relacionan con la estabilidad del COS, ya que se ha observado que en los agroecosistemas cafetaleros las fracciones más abundantes son las huminas heredadas y los ácidos fúlvicos y una relativa menor proporción de ácidos húmicos (García-Calderón *et al.*, 2001, Ibañez-Huerta *et al.*, 2002). Además, está relacionada con los procesos de mineralización de la materia orgánica lo cual influye la dinámica del pH, bases del suelo y contenidos de nutrimentos como nitrógeno, fósforo y azufre (Porta *et al.*, 2003). En este caso, se ha observado que los sitios relaciones de C/N cercanos a 12 por lo que se considera que la dinámica de mineralización de la materia orgánica es adecuada (Stevenson y Cole, 1999). Además se observan patrones heterogéneos en la dinámica de producción de carbono, esto puede indicar la presencia de materiales biodegradables lo que estaría concordando con la presencia de sustancias de carácter fúlvico en los cafetales (Ibañez-Huerta *et al.*, 2002). Esto conlleva a que haya una mayor

dinámica en la mineralización de la materia orgánica en los agroecosistemas cafetaleros que en sitios poco perturbados, ya que se ha observado que en ecosistemas poco perturbado se da una baja evolución de C-CO<sub>2</sub>, asociada con una mayor humificación de la materia orgánica del suelo (Grisi *et al.*, 1998). Además, los sitios presentan un importante contenido de sustancias húmicas recalcitrante que controlan la mineralización y el almacén del carbono del suelo (Porta *et al.*, 2003, Ibañez-Huerta *et al.*, 2002). La variación en la dinámica de mineralización de la materia orgánica sugiere que la actividad biológica y la composición de la materia orgánica son muy variables; así como hay una entrada de residuos orgánicos jóvenes que proporcionan una importante fuente de carbono en el suelo (Giampolo *et al.*, 1996).

En los Luvisoles, el horizonte superficial es menos oscuro que en los otros grupos de suelo. A pesar de esto, se consideraron como sitios muy estables, relacionados con su génesis y a la poca variación de sus características físicas y químicas en el horizonte superficial. Esta estabilidad puede explicarse debido a la presencia de compuestos organominerales donde el humus se asocia con las arcillas y los coloides de fierro y aluminio lo cual forma parte de la protección de la materia orgánica a los procesos de mineralización (Porta *et al.*, 2003).

La alta variabilidad en los diferentes grupos de suelo se relaciona con las condiciones del sitio. De manera particular se observó que las diferentes condiciones de apertura del dosel influenciaron a las propiedades físicas y químicas del suelo. Aunque es importante señalar que las relaciones de cambio fueron muy bajas (Cuadros 17, 18 y 19). Esto se puede explicar debido a la alta dinámica morfológica de la zona que propicia el movimiento de materiales en zonas de laderas pronunciadas; así como las condiciones de temperatura y humedad, en estas zonas tropicales las cuales aceleran los procesos de mineralización, y otros factores como la diversidad del material parental (García-Calderón. 2006, Krasilnikov *et al.*, 2005, García-Calderón *et al.*, 2000). Otro elemento importante fue la cobertura vegetal, que si bien regula las condiciones dentro del bosque (Parker, 1995; Barradas y Fanjul, 1984). En el caso del dosel, éste se encuentra compuesto por un importante número de familias, géneros y especies, predominantemente arbóreas, que lo llevan a ser considerado como un Jardín de Café, que de acuerdo con Moguel y Toledo (2005), éste sistema se compone de un estrato arbóreo que funciona como sombra al cafetal y donde el sotobosque ha sido remplazado por los arbustos de café. Esto conlleva una diversificación de fuentes orgánicas de nutrientes del suelo (Romero-Alvarado *et al.*,



2002). Los Phaeozems presentaron el mayor número de relaciones entre las variables edáficas y las condiciones de apertura del dosel. En cambio que las relaciones de la apertura del dosel en los Umbrisoles y Luvisoles fueron bajas, a pesar de que se han reportado tendencias de relación en cuanto a los cambios con la disminución de la cobertura vegetal (Vinton, 1995; Allen, 1985). Estas diferencias en las relaciones entre las variables del agroecosistema pueden atribuirse la diferencia de procesos en cada grupo de suelo (Driessen, 2001).

La respuesta de los Phaeozems y Umbrisoles a las diferentes condiciones de apertura se presentaron con el pH (potencial), Nt,  $P_{\text{disponible}}$ ; mientras que de manera menos intensa con C/N, en los Phaeozems. En los Phaeozems, el sitio con menor apertura (S5) tuvo una alta densidad de árboles, bajo pH, Nt y débil mineralización (C/N). En tanto bajo condiciones de mayor apertura la densidad arbórea fue menor; hubo un bajo pH, menor concentración de Nt, y débil mineralización de la MOS (C/N) (Cuadro 3 y Figura 18). Aunque la tasa de mineralización de la materia orgánica fue mayor en el sitio con mayor apertura (S8) (Figura 4). Esto mostró que los Phaeozems tiene una mayor respuesta a los cambios del dosel. En los Umbrisoles la condiciones de apertura no evidenciaron condiciones contrastantes (Figura 14) y no se detectó una respuesta del suelo a la apertura del dosel (Cuadro 17). A pesar de esto la tendencia fue que S4, con respecto de S7, tuvo una ADR ligeramente mayor, tuvo baja densidad arbórea, baja concentraciones de humedad, baja resistividad, baja concentración de carbono, nitrógeno,  $N_{\text{mineralizable}}$  y una débil mineralización de MOS (C/N) y baja concentración de potasio (Cuadro 6). Un rasgo importante de mencionar fue una distribución gradual en la apertura del dosel (Figura 15), que puede relacionarse con los algunos parámetros del suelo. En este caso la tendencia de relación se observó con los patrones de mineralización de la materia orgánica, ya que los puntos con una mayor apertura tuvieron una baja tasa de mineralización, en tanto que los puntos con menor apertura tuvieron una tasa de mineralización mayor, este patrón se mantuvo a pesar del cambio estacional (Figura 8). Esto se podría mostrar una repuesta del suelo al cambio de condición del dosel. El análisis de sitio en los Luvisoles no evidenció una clara diferencia en la apertura del dosel (Figura 16). A pesar de esto se presentó una relación de cambio negativa entre el nitrógeno y la ARD (Cuadros 19). Los cambios en la concentración del nitrógeno pueden ser muy sensibles a los ligeros cambios del dosel. Esto puede relacionarse a las formas disponibles, en este caso la tendencia fue que el sitio ligeramente más abierto (S2) tuvo

una menor concentración de nitrógeno orgánico potencialmente mineralizable (Figura 9). De manera general la tendencia en los Luvisoles fue que el S1 tuvo una apertura ligeramente mayor y donde la concentración del COS, Nt y  $N_{\text{mineralizable}}$  fueron bajas y una mejor tasa de mineralización de la materia orgánica (C/N). Además presentó una mayor resistividad y menor concentración de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . En cuanto a la velocidad de mineralización de la materia orgánica presentó patrones poco heterogéneos, bajo diferentes condiciones de apertura. Los patrones la tasa de degradación de la materia orgánica tendieron a mantenerse entre la épocas de secas y de humedad. Esto podría explicarse con hebreo de que los Luvisoles presentan un mayor proceso evolutivo cuyas condiciones de suelo son más estables (García-Calderón *et al.*, 2006). Aunque la presencia de un horizonte superficial ócrico con una menor acumulación de materia orgánica puede ser sensible a los cambios de la apertura que se vio reflejada en una menor concentración de carbono y nitrógeno (Cuadro 9). Las variaciones del pH, C/N y nitrógeno total, en los horizontes superficiales, debido a la apertura del dosel en los diferentes grupos de suelo muestran que pueden ser influenciados por los cambios de la temperatura y humedad lo que influye de manera indirecta en las reacciones químicas. Esto se debe a que bajo condiciones de mayor apertura se establecen una mayor descomposición de los residuos orgánicos e incrementa el proceso de mineralización de la materia orgánica. Esto conlleva a una movilización de elementos como las bases del suelo, nitrógeno y fósforo (Porta *et al.*, 2003; Stevenson y Cole, 1999).

Los suelos con un mayor manejo productivo de café fueron los Phaeozems, Umbrisoles y Luvisoles debido a sus propiedades (Romero-Alvarado *et al.*, 2002; Comeau y Krasilnikov, 2006), ya que dentro de la zona cafetalera de la Sierra Sur de Oaxaca se presenta una alta diversidad edáfica (García-Calderón, 2000). El análisis de resultados de la producción del café y de las características del suelo mostraron que en el caso de los Phaeozems la mayor productividad se dio bajo condiciones de pH de 6.0, en el más bajo contenido de humedad, resistividad, carbono, mejor relación C/N, mayor concentración de nitrógeno y la mayor concentración de calcio y magnesio (Cuadro 3 y Figura 19). En tanto que para los Umbrisoles, la mayor producción de cereza de café se estableció en el sitio con menor humedad, menor resistividad, con un pH de 5.8, con el menor contenido de carbono, nitrógeno, mejor relación de C/N, menor contenido de potasio y mayor concentración de magnesio (Cuadro 6 y Figura 19). En los Luvisoles, la mayor producción de cereza de café se estableció en los sitios con mayor humedad, menor resistividad, pH

5.8, mayor contenido de carbono y mayor concentración de potasio, calcio y magnesio (Cuadro 9 y Figura 19). Esto muestra que si bien, estos suelos no son considerados como óptimos para la producción de café, ya que los Andosoles suelen ser más empleados para este cultivo (Ramos et al., 1982), los requerimientos para el cultivo de café depende de las características particulares de cada grupo de suelos. La evaluación de café en Umbrisoles, dentro de la Sierra Sur de Oaxaca, ha mostrado que la mayor producción de cereza de café se presenta en un pH de 6.5, en tanto que para los suelos con horizontes árgico la mayor producción se establece en suelos con reacción más ácida (pH 5.5) (Comeau y Krasilnikov, 2006). También es importante mencionar que el café de la zona de Pluma Hidalgo, Oaxaca, se encuentra con buenos rendimientos y mayor talla de semillas de café sobre el café que se establecen en zonas de Andosoles en Veracruz (López-García *et al.*, 2000). A pesar de estos Andosoles han sido considerados con una mejor aptitud productiva de café, los Phaeozems y Luvisoles son considerados como fértiles y pueden tener un alto potencial agrícola, aunque tiene una alta vulnerabilidad a la pérdida, sobre todo en laderas pronunciadas. En tanto que los Umbrisoles pueden ser cultivados aunque sus condiciones de pH y el factor nutrimental pueden ser un factor limitante lo cual requeriría su manejo intensivo (Driessen, 2001). En este sentido la productividad de los sitios estudiados tuvieron una importante relación con las propiedades del suelo, contrario a lo encontrado por Romero-Alvarado *et al.*, 2002). Aunque es importante mencionar que ésta depende de el grupo de suelo.

En cuanto la relación entre la productividad y las condiciones de apertura del dosel fueron poco evidentes, ya que se establecieron algunas relaciones residuales (Cuadros 20, 21 y 22). A pesar de esto, la tendencia fue que en los Phaeozems y Umbrisoles la mayor producción se estableció en una apertura de 14% ( $0.14 \text{ mol/m}^2 \text{ día}^{-1}$ ) y cuya tendencia de producción fue negativa con la apertura (Cuadro 20 y 21), en tanto que la producción de cereza de café en los Luvisoles tuvo una tendencia contraria. Las variaciones en la productividad en cada sitio se deben al mosaico de ARD, sobre todo se ha visto que bajo condiciones de baja apertura, en sistemas con multiestratos hay una mayor producción de semillas de café que en sitios con mayor apertura y con pocos estratos (Romero-Alvarado *et al.*, 2002). Además se han evidenciado alteraciones fisiológicas en los cafetos con el cambio del ambiente lumínico (Fonseca *et al.*, 1999, Nutma, 1941 en Jiménez y Golberg, 1982 Ramos y Viñals, 1999) causando la variabilidad en la producción. Es importante mencionar que emplear sólo la producción de cereza de

café como una medida de eficiencia de productividad no necesariamente refleja las diferencias entre las condiciones del agroecosistema. Además de que la productividad de la planta de café depende de factores como la edad y el manejo del cafetal por lo deben de emplearse otros parámetros como el rendimientos y tamaño de las semillas de café (Comeau y Krasilnikov et al., 2006; Romero-Alvarado, 2002; López-García *et al.*, 2000).

De manera general, a partir de este trabajo se puede concluir que los agroecosistemas de Pluma Hidalgo, dentro de la SSO presentan una gran complejidad asociada una alta variabilidad de condiciones edáficas y por lo tanto a una alta diversidad de suelos.

## CONCLUSIONES

Los suelos en el sitio de estudio fueron Paheozems, Umbrisoles y Luvisoles los cuales se asociaron con las actividades productivas del café. Los suelos presentaron diferentes grados de desarrollo, que influencia la variabilidad de las propiedades del suelo en el horizonte superficial.

La apertura del dosel en los agroecosistemas cafetaleros es muy baja menor del 15% y se encuentra asociada a un importante número de especies vegetales que componen el dosel, por lo que pueden ser considerados con un manejo de bajo impacto.

La productividad de los cafetales fue muy baja con un rango entre 250 y 300 g de cereza de café en 625 m<sup>2</sup>. Donde la mayor producción se estableció en Umbrisoles y en Phaeozems ya que son los sitios con mayor manejo productivo.

La variación de las propiedades del suelo tiene una estrecha relación con los cambios de la cobertura vegetal, en los Phaeozems, en tanto que en los Luvisoles la relación entre propiedades del suelo y el dosel fue baja. En tanto que los Umbrisoles no tuvieron una clara respuesta a los cambios del dosel. La diversidad edáfica es importante ya que disminuye la vulnerabilidad de los agroecosistemas. Esto apoya la hipótesis de que la variabilidad de las propiedades de los suelos pueden estar influenciadas en algún grado por los cambio en el dosel en los agroecosistemas cafetaleros.

En los Phaeozems hubo una marcada relación negativa entre del dosel y el pH (real y potencia), nitrógeno total y con la relación carbono :nitrógeno, y de manera positiva con el fósforo disponible.

En el caso de los Luvisoles la relación con la apertura del dosel fue poca ya que solo se relaciono de manera negativa con el contenido de nitrógeno.

La productividad de cereza del café tuvo una estrecha relación con la apertura del dosel, en Phaeozems y una relación residual con la apertura del dosel en los Luvisoles. En tanto que en los Umbrisoles esta no fue clara. En Phaeozems, la productividad se relacionó de manera negativa con la resistividad del suelo y positiva con el pH, el nitrógeno total y el magnesio.

La productividad en los Umbrisoles tuvo baja relación con las propiedades del suelo, ya que se presentó una correlación negativa con el contenido de calcio, en tanto se obtuvo una relación residual negativa con la humedad.

La productividad en Luvisoles tuvo pocas relaciones y/o relaciones residuales con las propiedades del suelo. La relación fue negativa con la resistividad y positiva con el COS.

Los agroecosistema cafetaleros se caracterizaron por presentar una alta diversidad edáfica y alta variabilidad de sus propiedades físicas y químicas en el horizonte superficial. Además presentaron baja apertura del dosel y una alta diversidad de especies asociadas a la selva mediana subcaducifolia. Esto mantiene una baja exposición del suelo y de los cafetales por lo que el impacto del manejo es bajo.

Los agroecosistemas cafetaleros sobre Phaeozems pueden ser considerados como frágiles ya que presentaron el mayor numero de relaciones entre de las propiedades del suelo, la productividad y la apertura del dosel.

## Referencias Bibliográficas

- Aguilar, O, F. 1982. Estudio ecológico de las aves del cafetal. En: Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. Jiménez-Avila, E y Gómez-Pompa, A (eds). Continental, México, 103-128.
- Alfaro, S. G. 2004. Suelo. En: Biodiversidad de Oaxaca. García, A. J., Mendoza, M., Ordoñez, M., Briones-Salas, M (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México, pp. 55-65.
- Allen, J. 1985. Soil response to forest clearing in the United States and the tropics: Geological and biological factors. *Biotrópica*, 17(1): 15-27.
- Almendros, G., González-Vila F.J. and Martín F. 1990. Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest. An experimental approach to the effects of fire on humic substances. *Soil Science*, 149: 158-168.
- Barradas, V.L y Fanjul, L. 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. *Biotica*, 9(4), 415-421.
- Beer, J., Mushler, R., Kass, D and Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 38: 139-164.
- Bellingham, P. J. 1991. Land Influence patterns of hurricane damage: evidence from Jamaican montaine forest. *Biotrópica*, 23(4a): 427-433.
- Birkeland, W. P. 1999. Soils and geomorphology. Oxford University Press, New York.
- Blair, G., Lefroy, R., Whitbread, A., Blair, N y Heiko. D. The use of Carbon Management Index (CMI) to monitor changes in soil carbon. Symposium 12. World Congress of soil Science. ISSS-AISS-CICS. Montpellier. Francia.
- Boddey, R. M., De Moraes Sá, J.C., Alves, B.J., Urquiaga, S. 1997. The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural system in the tropics. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(5/6), 787-799.
- Bohn, H.L., MacNeal, B.L y O'Connor, G.A. 1985. Soil chemistry. John Wiley and Sons, New York.

- Centeno-García, E. 2004. Configuración geológica del estado de Oaxaca. En: *Biodiversidad de Oaxaca*. García Mendoza, A. J., Ordoñez, M., Briones-Salas, M. (eds), Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza- World Wildlife Fund, México, 29-42.
- Cházaro, B. M de J. 1982. Flora apícola de la zona cafetalera de Coatepec, Ver. En: *Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero*. Jiménez-Avila, E y Gómez-Pompa, A (eds), Continental, México, 95-102.
- ...Clasificación Sísmica Mexicana. 2000. Sistema Sismológico Nacional Universidad Nacional Autónoma de México ([www.ssn.unam.gob.mx](http://www.ssn.unam.gob.mx))
- ...Coffee Research Newsletter, 2000. Coffee quality and environmental conditions. 1(3). ([www.coffeeresearch.org](http://www.coffeeresearch.org)).
- ... Comisión Nacional del Agua-Sistema Meteorológico Nacional. 2004. Comisión nacional del agua ([www.cma-cna.gob.mx](http://www.cma-cna.gob.mx)).
- Comeau, L. P. Krasilnikov, P. V. 2006. Effect of soil properties on the quality and productivity of coffee in mountainous regions of Sierra Madre del Sur (Southern México). Soil, wine and other quality crops (poster sesion).18th World Congress of Soil Science,IUSS, Philadelphia, Pennsylvania, US A.
- ...CNOOC, 2005. Comisión nacional de organizaciones cafetaleras. La Jornada. Septiembre 26.
- ...Consejo Mexicano del Café, 1998. El café. Consejo mexicano del café. México. Octubre 28.
- ...CONABIO, 2004. Trayectoria del huracán Paulina. Comisión Nacional de Biodiversidad. México.
- Counforth, I. S. 1970. Reforestation and nutrient reserves in the humid tropics. *Journal Applied of Ecology*, 7: 609-619.
- Craswell, E.T. Sajjapongse, A., Howlett, D.J.B. 1998. Agroforestry in the management of sloping land in the Asian and the Pacific. *Agroforestry Systems*, 38:121-137.

- Dijkstra F. A. 2001. Effects of the tree species on the soil properties in a forest of the northeastern of United State. USA. Institute of Ecosystems Studies. USA.
- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O y Nachtergaele, F. 2001. Lecture notes on the major soils of the world, FAO-Roma.
- FAO-ISRIC-ISSS. 1998. World reference base for soil resources, Soil resources report No. 48, FAO, Rome.
- Feldman, S. B. Zelazny, L. W and Baker, J. C. 1991. High-elevation forest soils of the southern Appalachians: I. Distribution of parent materials and soils-landscape relationships. *Soil Science Society of America Journal*, 55:1629-1637.
- Fernández, B. I., Berroa, N. G., Soto, R. Y, Rodríguez, R. Pérez, D. A. Castro, M. N. 2003. Estructura florística de dos agroecosistemas y su influencia en el aporte de biomasa. *Café y Cacao*, 3(3): 78-80.
- Ferrusquía-Villafranca, I. 1998. Geología de México. Una sinopsis. En: Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución. Ramamoorthy, T., Bye, R., Lot, A., Fa, F (comps.) Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Fitzjarrald, R. D and Moore, E.K. 1995. Physical mechanisms of heat and mass exchange between forest and the atmosphere. En: Forest canopies. Lowman, M. D., Nadkarni, N (eds). Academic Press. USA.
- Fonseca, C. I., Rodríguez, R., Medina, R., Velasco, E., Zamora, R. 1999. Variación de las características anatómicas de las hojas de cafeto bajo diferentes niveles de irradiación y dosel de los cafetos en tres niveles de plantas, *Café Cacao*, 99: 25 – 27.
- Frangi, J. L. y Lugo, E. 1991. Ecosystem dynamics of a subtropical flood plain forest. *Biotrópica*, 23, 324 – 335.
- García-Calderón, N. E. 2001. Investigación para la evaluación de la estabilidad del carbono en el agroecosistema de la Sierra Sur de Oaxaca. Informe técnico final. CONACyT-Proyecto 282278B.
- García-Calderón, N. E., Ibáñez-Huerta, A., Alvarez-Arteaga, G., Krasilnikov P-V., Hernández-Jiménez, A. 2006. Soil properties in mountainous subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, México. *Canadian Journal Soil Science*, 86: 61-76.



- García-Calderón, N. E., Romero, F. E., Galicia, S., Ibáñez, A., Platero, B., Ramos, R y Almendros, G. 2001. Behavior of the soil biogeochemical cycles on control sites of coffee growing agroecosystem from Pluma Hidalgo, Oaxaca (México). En: *Biogeochemical processes and cycling of elements in the environment*. Weber, J, Jamroz, E., Drozd, A y Karczewska, A (eds). Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland. ISBN 83-906403-5-x.
- García, B. J., Montoya, M. J. M. 2003. Relación entre el balance hídrico del agua en el suelo y el rendimiento del cafetal (*Coffea arabica*) en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Tropical*, 24(1): 11-20.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen. Para adaptarlas a las condiciones de la Republica Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM.
- García, N; Velasco, F. Aguilera, H. 1989. Evolución regresiva de diversos parámetros edáficos en agrosistemas (cafetales, cañaverales) derivados del bosque mesófilo de montaña (México). *Anales de Edafología y Agrobiología*, 48(5-12):592-603.
- Giampolo, S., Pardo, M. T., Almendros, G. 1996. Effect of cultivation on chemical characteristics and respiratory activity of crusting soil from Mazowe (Zimbabwe). *Communication Soil Science and Plant Analysis*, 27(9&10): 2111-2124.
- Gianello, G., Bremner, J.M. 1988. A rapid steam distillation method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 19(14): 1551-1568.
- Grisi, B., Grace, C., Brookes, C.P., Benedetti, A and Dell'Abate, T. M. 1998. Temperature effects on organic matter and microbial biomass dynamics in temperate and tropical soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (10/II): 1309-1315.
- Guzmán, B. R. 1988. Algunos análisis bromatológicos en tres estratos de la copa arbustiva de *Coffea arabica* de una finca cafetalera del municipio del bosque de Chiapas. Tesis de Licenciatura (Biología). UNAM. México.
- Henao, J. J. 1982. El café en Venezuela. Edición de la biblioteca de Caracas. Venezuela. 87-88.
- Henrot, J., Robertson, P. G. 1994. Vegetation removal in two soils of the humid tropics: effects on microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 16: 111-116.

- Hernández, J. R., Ortiz, M. A., Zamorano, J. J. 1996. Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Investigación Geográfica*, 31, 45-67.
- Ibañez-Huerta, A., Romero, F. E., Álvarez-Arteaga, G y García-Calderón, N.E. 2001. Sustancias húmicas en suelos cafetaleros en la finca el Sinaí, Oaxaca (México). XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. CD., Varadero, Cuba.
- INEGI, 1997a. Carta Fisiográfica 1:250,000. E14-12. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- INEGI, 1997b. Carta Geológica 1:250, 000. E14-12. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- INEGI, 1988a. Carta Edafológica 1:250,000. E14-12. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- INEGI, 1988b. Carta Topográfica 1:50,000. D14B18. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- ...INMECAFE, 1992. Importancia de la Cafeticultura: en Confederación de productores de café. Oaxaca. México.
- ..INMECAFE, 1990. El cultivo del cafeto en México. La Fuente, México. 29-31.
- Jimenez-Avila, E; Golberg, A. D. 1982. Distribución de la biomasa aérea en diferentes estratos del cafetal. En: Estudios ecológicos de los sistemas cafetaleros. Jiménez-Ávila, E y Gómez-Pompa, A (eds). Continental, México. 64-75.
- Jiménez- Avila, E. 1982. Comparación de la producción de materia orgánica de un bosque caducifolio y el cafetal. En: Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. Jiménez-Avila, E., Gómez-Pompa, A (eds). Continental, México. 55-63.
- Krasilnikov, P. V., García-Calderón, N. E., Sedov, S. N., Vallejo-Gómez, E., Ramos-Bello, R. 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, México. *Catena*, 62: 14-44.
- Lodge, D. J and MacDowell, H. W. 1991. Summary of ecosystem – level effects of caribbean hurricanes. *Biotrópica*, 23:373-378.

- Lodge, J. D., Scatena, F. V., Asbury, C. E., Sánchez, J.M. 1991. Fine litterfall and related nutrient input resulting from hurricane Hugo in subtropical wet and lower mountain rain forest of Puerto Rico. *Biotrópica*, 23, 336-342.
- Lopez-García, F.J., Escamilla, P. E., Zamarrita, C. A. Fugueroa, J. O., Carrión, R. M. 2000. Comportamiento agronómico y calidad de variedades de café en regiones de Veracruz y Oaxaca, México. CRUO/CENIDERCAFE. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 28-31.
- Maass, M; García-Oliva, F. 1990. La conservación de suelos en zonas tropicales: caso de México. *Ciencia y Desarrollo*, 15(90): 21-36.
- Masciandaro, C, Ceccanti B. y Gallardo-Lancho J.F. 1998. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 67:267-274.
- Matoso, A., Silva, S. R. H., de Freitas, G. B., Prieto, H.E., Ribeiro, G. S., Luiz, F. F. 2004. Growth and yield coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems*. 63:75-82.
- Moguel, P., Toledo, V. M. 1996. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad, *Ciencias*, 4: 40-51.
- Moguel. P., Toledo, V. 1999. Conservación de la biodiversidad en sistemas de cultivo tradicional de café en México. *Conservation Biology*, 13:1-11.
- Moguel. P., Toledo, V. 2005. Conservar produciendo: Biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas*, CONABIO. México.
- Mogollón, P. J., García-Miragaya, J., Sánchez, F. L., Chacón, N y Araujo, J. 1998. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Tropical*, 47: 87-102.
- Morán, D. J., Corona, P., Tolson, G., 1996. Uplift and subduction-erosion in southwestern México since Oligocene: plutonic barometry constraints. *Earth Planetary Science Letter*, 141: 51-65.
- Musk, L. F. 1992. "Weather Systems", Cambridge University Press. Inglaterra.

- Ortiz, P, M. A., Hernández, S, J. R., Figueroa-Manh-Eng. J, M. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En: Biodiversidad de Oaxaca. García, A. J., Mendoza M. J., Ordoñez y Briones-Salas, M (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México, pp. 43-54.
- Page, A.L. (ed). 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. ASA, SSSA, Madison Wisconsin, USA.
- Parker, G, 1995. Structure and microclimate of forest canopies. *En: Forest canopies*. Lowman, M.D y Nadkarni, N (eds). Academic Press. USA.
- Parrotta, J. A y Lodge, J. D. 1991. Fine root in a subtropical wet forest following hurricane disturbance in Puerto Rico. *Biotrópica*, 23, 343-347.
- Perfecto, I., Armbrecht, I. 2002. The coffee agroecosystem in the neotropics: combining ecological and economic goals. En: Tropical Agroecosystems. Vandermeer, J. J (ed). CRC Press, NY, USA.
- Perfecto, I., Rice, R., Greenberg, R., Van der Voort, M. 1996. Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*, 46:598-608.
- Perfecto, I., Snelling, R. 1995 Biodiversity and Tropical Ecosystems Transformation: Ant, diversity in the coffee agroecosystem in Costa Rica, *Ecology Applications*, 5:1084-1097.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. Mundiprensa. España.
- Ramos, H., R., Viñals, N. R. 1999. Efectos del nivel de iluminación sobre los rendimientos y la calidad del grano en *Coffea arabica* var. Islas, Cubacafe'99, 99, 6-14.
- Ramos, S; Vallejo, E; Aguilera; N. 1982. Edafología del cafetal. En: Estudio ecológico en el agroecosistema cafetalero, Jiménez E., Gomez-Pompa, A (eds). Continental, México.
- Ramo, M., Rodrigo, A. L. 1994. Geografía General del Estado de Oaxaca. Carteles editores. Oaxaca. México.
- Rao, M.R., Nair, P.K.R., Ong, C.K. 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38:3-50.

- Rich, M. P. 1989. A manual analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos, EUA.
- Ricker, M., Siebe, Ch., Sánchez B. S., Shimada, K., Larson, C. B., Martínez-Ramos, M y Mostagnini. 1999. Optimising seedling management: *Pouteria sapota*, *Diospyros digyna*, and *Cedrela odorata* in a Mexican Rainforest. *Forest Ecology and Management*. 5016: 1-15.
- Romero- Alvarado, Y., Soto-Pinto, L., García-Barrios, L y Barrera-Gaytán, J. F. 2002. Coffee yields and soil nutriments under the shades of *Inga* sp. vs multiple species in Chiapas, México. *Agroforestry Systems*, 54:215-224.
- Roskoski, J. P. 1982. Nitrogen fixation in a Mexican Coffee Plantation. *Plant and Soil*. 67:283-291.
- Rzedowski, J., 1978. Vegetación de México. Limusa, México, D.F.
- Saikh, H., Varadachari, Ch., Kunal, G. 1998. Changes in carbon, nitrogen and phosphorus level to deforestation and cultivation: A case study in Simlipal National Park, India. *Plant and Soil*. 198: 137-145.
- Saikh, H. Varadachari. Ch., Kunal, G. 1998. Change in carbon, nitrogen and phosphorous level to deforestation and cultivation: A case study in Simlipal National Park, India. *Plant and Soil*, 198:137-145.
- Sánchez, S. 1984. Determinación de macronutrientes en suelos y muestras foliares de *Coffea arabica* en andosoles en las zonas cafetaleras de Hueytemalco, Edo, de Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sanford, R. L., Parton J. W., Ojima, D. S., Lodge, D. J. 1991. Hurricanes effects on soil organic matter dynamics and forest production in Luquillo experimental forest, Puerto Rico: results of simulation modeling. *Biotrópica*. 23: 364 - 372.
- Scatena, F. N., Larsen.C. M. 1991. Physical aspects of Hurricane Hugo in Puerto Rico. *Biotrópica*: 317–323.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C. and Broderson, W. D (eds). 2002. Field book for describing and sampling soil, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln NE.
- Silver, W. H., Scatena, F. N., Johnson, A. H., Siccama, T. G y Watt, F. 1996. At What scale does disturbance affects belowground nutrient pools?. *Biotrópica*, 28, 441-457

- Siebe, Ch., Jahn, R y Stahr, K. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Soto-Pinto, M. L. 1999. Manejo de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la región maya Tzotzil-Tzeltal del norte de Chiapas. Informe final, proyecto M018, CONABIO.
- Soto, G. 2005. Efecto del sistema de manejo del café (*Coffea arabica*), orgánico convencional, con diferentes árboles de sombra sobre las características de suelo en un Andisol en Nicaragua y un Ultisol en Costa Rica. En: La cafeticultura sostenible un desafío impostergable. XXI Simposio Latinoamericano de cafeticultura. El Salvador. UCA/PROMECAFE/PROCAFE.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernández, J y Caballero-Nieto, J. 2002. Shade effects on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, México. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 80: 61-69
- Sparling, G. P., Hart, P. B. S., August, J. A., Leslie, D. M. 1994. A comparison of soil and microbial carbon, nitrogen, and phosphorus contents, and microaggregates stability of a soil under native forest and after clearance for pastures and plantation forest. *Biology and Fertility Soils*, 17: 91-100.
- Steudler, P.A., Melillo, J.M. Bowden, D.R., Castro, S.M., Lugo, E.A. 1991. The effects of natural and human disturbance on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. *Biotrópica*. 23: 356-363.
- Stever, C. 1999. Managing ground cover heterogeneity in coffee (*Coffea arabica* L.) under managed tree shades: from replicated plots to farmer practice. En: Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems, Buck, E. L., Lassoie, P. J., Fernandez, C. H. E. (eds), CRC Press, Lewis Publ., Boca Ratón, Florida.
- Stevenson, F. J., Cole, M. A. 1999. Cycles of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients. John Wiley & Sons. Inc. USA.
- Tapia-Coral, S.C., Luizão, J. F., Wandelli, E., Fernández, M.C. 2005. Carbon and nutrient stock in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. *Agroforestry Systems*. 65:33-42.
- Ticante, R. J., García, C. N., Aguilera, N., Galicia, P. S., Ramos, B. R., Velasco, P. F. 1993. Características de la materia orgánica en los suelos cafetaleros de la

- Sierra Norte de Puebla, (México). En: El estudio del suelo y su degradación en la relación con la desertificación. Gallardo. L. F. J (ed.). 2:821-828.
- Torres-Colín, R. 2004. Tipos de vegetación. En: Biodiversidad de Oaxaca, García Mendoza, A. J., Ordoñez, M., Briones-Salas, M. (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México, pp. 105-117.
  - Trejo, I. 2004. Clima. En: Biodiversidad de Oaxaca,. García Mendoza, A. J., Ordóñez, M. J., Briones-Salas, J (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México.
  - Van Breemen, N y Buurman, P. 1998. Soil Formation. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
  - Van Reeuwijk, L. P (ed). 1999. Procedures for Soil Analysis, ISRIC-FAO. ISRIC. Technical Paper. No 9.
  - Velasco, B. E., Medina, R., Rodríguez, L., Fonseca, I., Verdecia, J. 1999. Distribución de especies sombreadoras del cafeto en la provincia de Granma. Cubacafe´99, 48-49.
  - Velasco. F., García, C. N. E., Aguilera, N. 1990. Investigaciones edafológicas de diversos agrosistemas en Veracruz (México). En: La cooperación y manejo de los suelos com fundamento para el desarrollo de América Latina. Villegas, D. R., Ponde de León, D (eds). Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia de la ciencia del suelo. La Habana, Cuba. 2: 135-139.
  - Vinton, M.A. 1995. Interactions between individual plant species and soil nutrient status in shortgrass steppe. *Ecology*, 76(4): 116-1133.
  - Vitousek, M. P., Gosz, R. J., Grier, C. C., Melillo, M. J. Reiners, A.. W. 1982. A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecological Monographs*, 52(2): 155-177.
  - Vogt, A. K., Vogt, J. D., Boon, P.,Covich, A., Scatena, N. F., y Asbjorsen, H. 1996. Litter dynamics along stream, riparian and upslope areas following hurricane Hugo, Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Biotrópica*. 28: 458– 470.
  - Watanabe, A., Sarno, J. Rumbanraja, Tsutsuki, K., Kimura M. 2001. Humus composition of soil under coffee and arable cultivation in hilly areas of south Sumatra, Indonesia. *European Journal of Soil Science* .52(4): 599-606.

- Werner, G. 1984. Change in soil properties during tropical wet forest succession in Costa Rica. *Biotrópica*, 16, 43-50.
- Zamora, E., Chaterlan, Y. 1999. Balance hídrico del cafeto en la región oriente de Cuba. *Cubacafé* 99, 46.
- Zar, H.J.1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, USA