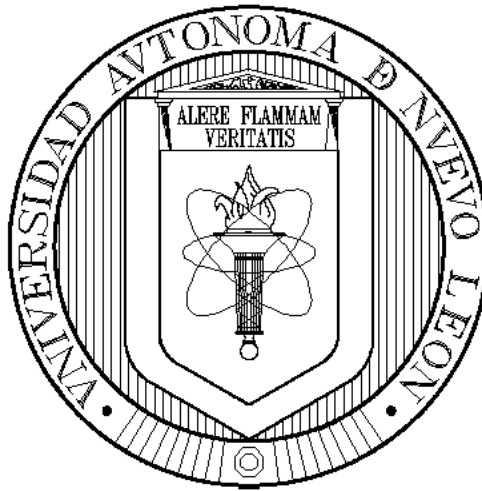


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**DINÁMICA DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES  
EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS**

Por

EDWIN GEYNER VERDUGO MORALES

Como requisito parcial para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES

Febrero, 2026

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**DINÁMICA DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES  
EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS**

Por

**EDWIN GEYNER VERDUGO MORALES**

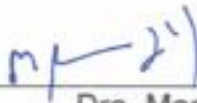
Como requisito parcial para obtener el grado de  
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES**

Febrero, 2026

DINÁMICA DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES

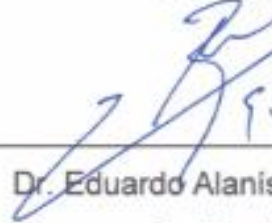
EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS

Aprobación de tesis



---

Dra. María Inés Yáñez Díaz  
Director



---

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez  
Codirector



---

Dr. Humberto González Rodríguez  
Asesor



---

Dr. Fortunato Garza Ocaña  
Asesor



---

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi  
Asesor externo

Febrero, 2026

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca para cursar el programa de Doctorado en Ciencias.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por ser una institución académica y de investigación de alto nivel y prestigio.

Al personal docente y administrativo del programa de Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por las facilidades otorgadas.

## **DEDICATORIAS**

Dedico este logro a mi familia, a Dios, al universo, a la madre tierra y a mis amigos. A los de antes, a los que permanecieron y a los que llegaron.

Porque la ciencia es una experiencia que se disfruta al compartirla.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS-----	i
ÍNDICE DE FIGURAS-----	iii
RESUMEN-----	iv
ABSTRACT-----	v
INTRODUCCIÓN-----	1
JUSTIFICACIÓN-----	2
HIPÓTESIS-----	3
OBJETIVO DEL TRABAJO: (OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES)-----	3
Objetivos particulares-----	3
CAPÍTULO 1. ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD DEL DOSEL ARBÓREO USADO COMO SOMBRA EN LA PRODUCCIÓN TRADICIONAL DE CAFÉ-----	4
RESUMEN-----	4
INTRODUCCIÓN-----	5
MATERIALES Y MÉTODOS-----	6
Área de estudio-----	6
Metodología-----	7
RESULTADOS-----	11
Riqueza de especies-----	11
Diversidad alfa-----	14
Diversidad beta o similitud de especies-----	16
Estructura-----	16
Índice de Valor de Importancia (IVI)-----	18
DISCUSIÓN-----	24
Riqueza de especies arbóreas-----	24

Diversidad alfa -----	26
Diversidad beta o similitud de especies-----	27
Estructura -----	28
Índice de Valor de Importancia-----	30
<b>CAPÍTULO 2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE TRES TIPOS DE SUELOS EN ESQUEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ BAJO SOMBRA.</b>	
RESUMEN -----	31
INTRODUCCIÓN-----	32
MATERIALES Y MÉTODOS -----	33
Área de estudio -----	34
Muestreo de suelos -----	35
RESULTADOS-----	36
Densidad aparente-----	40
Conductividad eléctrica -----	40
pH -----	41
Materia orgánica-----	41
Nitrógeno -----	42
Fósforo-----	42
Potasio-----	43
Calcio-----	44
Magnesio -----	44
Manganeso -----	45
Hierro-----	45
Cobre-----	46
Zinc -----	47
DISCUSIÓN -----	48

Densidad aparente-----	48
Conductividad eléctrica-----	49
pH-----	49
Materia orgánica-----	50
Nitrógeno-----	52
Fósforo-----	53
Potasio-----	55
Calcio-----	56
Magnesio-----	57
Manganeso-----	58
Hierro-----	59
Zinc-----	59
Cobre-----	60
CONCLUSIONES-----	62
BIBLIOGRAFÍA-----	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables y fórmulas utilizadas para análisis del dosel arbóreo utilizado como sombra en cafetales.....	9
Tabla 2. Listado de árboles de sombra presentes en los cafetales en los intervalos superior (1), intermedio (2) e inferior (3). .....	12
Tabla 3. Índice de valor de importancia del intervalo superior.....	18
Tabla 4. Índice de valor de importancia del intervalo intermedio .....	20
Tabla 5. Índice de valor de importancia intervalo inferior.....	22
Tabla 6. Métodos utilizados para las variables fisicoquímicas en muestras de suelos.....	35
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de las parcelas estudiadas.....	38
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas por tipo de suelo. Los datos muestran la media y el intervalo de confianza al 95% (n=9). .....	39
Tabla 9. Clasificación de resultados de densidad aparente (SEMARNAT, 2000). .....	40
Tabla 10. Interpretación de conductividad eléctrica (SEMARNAT, 2000). .....	40
Tabla 11. Clasificación de suelos en cuanto a su valor de pH (SEMARNAT, 2000). .....	41
Tabla 12 . Clasificación de suelos conforme a su contenido de materia orgánica (SEMARNAT, 2000). .....	41
Tabla 13. Interpretación de resultados de nitrógeno (SEMARNAT, 2000). .....	42
Tabla 14. Interpretación de resultados de fósforo (SEMARNAT, 2000). .....	43
Tabla 15. Interpretación de resultados de potasio (SEMARNAT, 2000) .....	44
Tabla 16. Interpretación de los resultados de calcio (SEMARNAT, 2000). .....	44
Tabla 17. Interpretación de los valores de magnesio (SEMARNAT, 2000).....	45

Tabla 18. Interpretación de los valores de manganeso (SEMARNAT, 2000) ...	45
Tabla 19. Interpretación de los valores de hierro (SEMARNAT, 2000) .....	46
Tabla 20. Interpretación de los valores de cobre (SEMARNAT, 2000) .....	46
Tabla 21. Interpretación de los valores de Zinc (SEMARNAT, 2000).....	47
Tabla 22. Concentraciones de valores obtenidos y recomendados para el cultivo de café según Sadeghian (2019). .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la región de estudio, tipos de suelos y parcelas de muestreo, en Motozintla, Chiapas. ....	7
Figura 2. Intervalos de la riqueza de especies arbóreas al 96.73% de cobertura de muestra en los rangos de altitud estudiados en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas.....	12
Figura 3. Diversidad alfa (Shannon-Wiener) de los árboles de sombra en los tres intervalos de altitud estudiados, obtenidos con la técnica de Bootstrap y el software SPADE. ....	15
Figura 4. Diversidad de los árboles de sombra expresado en número efectivo de especies, por intervalo altitudinal. ....	16
Figura 5. Dendrograma de similitud de especies entre intervalos de altitud ....	16
Figura 6. Distribución de los valores de área basal de los árboles de sombra en los tres intervalos altitudinales estudiados. ....	17
Figura 7. Distribución en clases diamétricas en centímetros de los árboles de sombra de los cafetales, en los intervalos de altitud estudiados. ....	17
Figura. 8. Área basal de los árboles de sombra en cafetales, por intervalos de altitud estudiados.....	18
Figura 9. Tipos de suelos en la zona cafetalera de estudio en Motozintla, Chiapas.....	34
Figura 10. Fósforo en los tres tipos de suelos cafetaleros.....	43
Figura 11. Distribución de los valores de cobre (mg/kg) en los tres tipos de suelos estudiados (p=0.03) .....	46
Figura 12. Valores encontrados de cobre en todas las parcelas de los tres tipos de suelos estudiados. ....	47

## RESUMEN

Para conocer la dinámica de nutrientes en cafetales cultivados bajo sombra en una región de la Sierra Madre de Chiapas se caracterizó y contrastó el dosel arbóreo asociado a los cafetales, así como el estado actual del suelo. Se localizó la distribución de los cafetales y se dividió en tres intervalos altitudinales: superior, 2,000 a 1,800 msnm, intermedio de 1,800 a 1,200 msnm e inferior de 1,200 a 800 msnm. Se encontró que la riqueza de especies arbóreas fue significativamente mayor para los intervalos inferior y superior (91 especies), mismos que se traslaparon con selva mediana y bosque mesófilo de montaña respectivamente. La diversidad alfa medido con el índice de Shannon-Wiener y el número efectivo de especies, reveló que el intervalo superior fue significativamente mayor ( $H' = 3.9$  y 50 especies), y se clasificó como de alta riqueza; el intermedio ( $H' = 3.24$  y 26 especies) y el inferior ( $H' = 3.36$  y 29 especies) como riqueza media. En área basal el intervalo superior e inferior fueron mayores en comparación al intermedio ( $p=0.04$ ); en densidad de individuos por hectárea no se encontró diferencias significativas. Se encontró que *Pinus maximinoi*, *Inga vera* y *Chamaedorea tepejilote* son las especies de mayor importancia ecológica para los intervalos superior, intermedio e inferior respectivamente. En relación con los suelos, se evaluaron y contrastaron los suelos presentes en la región: acrisol, cambisol y regosol. Se usaron las variables de pH, densidad aparente (DA), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), hierro (H), cobre (Cu) y zinc (Zn). Se encontró diferencias significativas entre tipos de suelos en P, Cu y Fe. En general los suelos cafetaleros conservan en gran medida su integridad en relación con otros sistemas agrícolas intensivos. Se concluye que los sistemas agroforestales de café bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas son valiosos porque resguardan gran riqueza y diversidad arbórea y conservan gran parte de la integridad del suelo, aun después de varias décadas de cultivos.

## ABSTRACT

To understand nutrient dynamics in shade-grown coffee plantations in a region of the Sierra Madre de Chiapas, the tree canopy associated with the coffee plantations was characterized and compared, as well as the current soil condition. The distribution of the coffee plantations was located and divided into three altitudinal intervals: upper (2,000 to 1,800 masl), intermediate (1,800 to 1,200 masl), and lower (1,200 to 800 masl). It was found that tree species richness was significantly higher in the lower and upper intervals (91 species), which overlapped with medium-height tropical forest and montane cloud forest, respectively. Alpha diversity, measured with the Shannon-Wiener index, and the effective number of species revealed that the upper interval was significantly higher ( $H' = 3.9$  and 50 species), and was classified as having high species richness. The intermediate ( $H'=3.24$  and 26 species) and lower ( $H'=3.36$  and 29 species) intervals were considered to have average species richness. In basal area, the upper and lower intervals were larger compared to the intermediate interval ( $p=0.04$ ); no significant differences were found in the density of individuals per hectare. *Pinus maximinoi*, *Inga vera*, and *Chamaedorea tepejilote* were found to be the most ecologically important species for the upper, intermediate, and lower intervals, respectively. Regarding soils, the soils present in the region— Acrisol, Cambisol, and Regosol—were evaluated and compared. The following variables were used: pH, aparent density (AD), electrical conductivity (EC), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), manganese (Mn), iron (H), copper (Cu), and zinc (Zn). Significant differences were found between soil types in P, Cu, and Fe. In general, coffee-growing soils largely retain their integrity compared to other intensive agricultural systems. It is concluded that shade-grown coffee agroforestry systems in the Sierra Madre of Chiapas are valuable because they protect a great diversity of tree species and maintain much of the soil's integrity, even after several decades of cultivation.

## INTRODUCCIÓN

A diferencia de los ecosistemas forestales no intervenidos, en los agroecosistemas los nutrientes pueden verse alterados por la irrupción de las actividades antropogénicas, principalmente por la extracción de alimentos y materias primas. Con el actual aumento poblacional, la creciente demanda de espacios para las actividades socioeconómicas que conlleva una mayor demanda de servicios ecosistémicos, es necesario diseñar sistemas de producción en donde las necesidades humanas, como la producción de alimentos, esté articulada con la salud de los ecosistemas y se busque una producción con esquema sostenible (Guhl, 2009).

Los sistemas agroforestales son esquemas de producción diseñados para obtener productos agrícolas, a la vez mantener gran parte del ecosistema forestal y por ende sus servicios ecosistémicos (Villarreyana *et al.*, 2020). En México, estos esquemas productivos se diseñaron bajo una cosmogonía indígena de producir con respecto a la madre tierra, y gran parte de ese legado se ha perpetuado hasta nuestros días; autores como Moreno-Calles *et al.*, (2013) han denominado a este conjunto de conocimientos, esquemas productivos y tradiciones: “diversidad biocultural”.

En México uno de los cultivos que se realizan bajo un esquema agroforestal es el café. Dos terceras partes del café mexicano se produce bajo sombra de árboles (Moguel y Toledo, 2004), brindando servicios ecosistémicos como captación de agua, protección del suelo, captura de carbono, protección y conservación de la biodiversidad entre ellos plantas, epífitas, aves, insectos y anfibios (Anta, 2006).

Dos de los servicios ambientales que se mantiene en gran medida en los cafetales bajo sombra, son la biodiversidad y el flujo de nutrientes (Schroth *et al.*, 2001) y esto, a medida que se mantiene la estructura y funcionalidad de los ecosistemas forestales (Moguel y Toledo, 1999; Soto-Pinto *et al.*, 2001).

Por lo anterior, este trabajo se enfocó en caracterizar por separado dos eslabones importantes dentro del ciclo interno de nutrientes del sistema agroforestal: el componente arbóreo y el estado actual de los nutrientes en el suelo. La caracterización del dosel arbóreo permitirá describir de manera puntual y precisa la diversidad arbórea que resguardan estos cafetales, dicho dato nos permitirá valorar en términos ecológicos la importancia de los cafetales bajo sombra y su papel en la conservación de los recursos naturales. La caracterización nutrimental de los suelos permitirá valorar la importancia del dosel arbóreo en la conservación del suelo, mejorar prácticas de manejo para corregir deficiencias nutrimentales y así mantener la productividad y conservación de estos valiosos ecosistemas.

## **JUSTIFICACIÓN**

Los sistemas agroforestales son esquemas productivos que nacieron al introducir plantas de interés agrícola bajo árboles nativos en tiempos ancestrales. Con el paso del tiempo la agricultura fue sistematizándose, simplificando los agroecosistemas, y con ello los problemas ambientales que trajo consigo. Actualmente, ante la necesidad de preservar y restaurar los ecosistemas, los esquemas agroforestales recobran importancia.

Al resurgimiento del interés en estos esquemas productivos, es necesario añadirle ciencia y tecnología, para abonar a su sostenibilidad, ya que gran parte del cultivo de café bajo sombra, lo realizan pequeños productores indígenas (SADER, 2020) que no tienen acceso a recursos técnicos-científicos.

Actualmente los pequeños productores de café en esquemas tradicionales en México operan bajo pérdida (Muñoz-Rodríguez *et al.*, 2019) no obstante, sus cafetales son de gran importancia ambiental (Manson *et al.*, 2018). Si dejan de producir café para producir otras materias primas, el daño ambiental sería mayúsculo. Trabajos de investigación como este, abonan grandemente a generar información en la búsqueda de la sostenibilidad de estos ecosistemas que resguardan gran diversidad biocultural.

Aunado a lo anterior este trabajo de investigación se alinea a las nuevas políticas mundiales de producir bajo esquemas sustentables (FORBES, 2023) y a los nuevos planes nacionales de aumentar la producción de café sostenible (SADER, 2025).

## **HIPÓTESIS**

Tanto el estrato arbóreo y las propiedades fisicoquímicas de los suelos presentan cambios significativos en su dinámica en los cafetales estudiados.

## **OBJETIVO DEL TRABAJO: (OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES)**

Conocer la dinámica de nutrientes en sistemas agroforestales de café bajo sombra, caracterizando el componente arbóreo asociado y las propiedades fisicoquímicas del suelo.

### **Objetivos particulares**

- Conocer la riqueza, estructura y diversidad del dosel arbóreo en cafetales, comparando entre rangos de altitud.
- Describir y contrastar las características fisicoquímicas de los suelos bajo esquemas de producción agroforestal.

# CAPÍTULO 1. ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD DEL DOSEL ARBÓREO USADO COMO SOMBRA EN LA PRODUCCIÓN TRADICIONAL DE CAFÉ

## RESUMEN

Se caracterizó la estructura arbórea usado como sombra en cafetales, en el contexto de la dinámica de nutrientes en sistemas agroforestales arboles-café. Para este capítulo, el área de estudio se dividió en tres estratos altitudinales: el inferior de 800 a 1, 200 msnm, el intermedio de 1, 200 a 1,600 msnm y el superior de 1,600 a 2,000 msnm. Se encontró que la riqueza de especies es significativamente mayor tanto en el intervalo inferior y en el superior debido a que se traslapan con ecosistemas de alta riqueza como la selva mediana perennifolia y bosque mesófilo de montaña. La diversidad alfa medido con el índice de Shannon-Wiener y el número efectivo de especies muestra que el intervalo superior es mayor debido a que presenta mejor equitatividad. Los cafetales del intervalo superior tienen una diversidad alta y el intermedio e inferior diversidad media. Con respecto a la estructura horizontal el intervalo inferior presentó altos valores de densidad (individuos/hectárea). En área basal por hectárea el inferior y superior mostraron los mayores valores. *Pinus maximinoi* Lindl, *Inga vera* Willd y *Chamaedorea tepejilote* Liebm fueron las especies de mayor importancia ecológica para los intervalos superior, intermedio e inferior respectivamente. Se concluye que los cafetales bajo sombra, a pesar de ser ecosistemas intervenidos, son de gran importancia para la conservación ecológica ya que su estructura y diversidad, muestran índices iguales o mayores que ecosistemas forestales.

## INTRODUCCIÓN

Chiapas es el principal productor de café en México (SIAP, 2023) y es uno de los principales productores de café orgánico a nivel mundial (Flores-Vichi, 2015). En este esquema de producción, se prohíbe el uso de pesticidas y se fomenta la conservación de la biodiversidad (LPO, 2006) incluyendo la arbórea que sirve también de sombra para el cultivo.

La producción de café bajo sombra en México se caracteriza porque está mayormente en manos de pequeños productores indígenas (SADER, 2020) con un promedio de 2 hectáreas por familia productora (Robles, 2011). Este cultivo, aunque es originario de África, ha sido apropiado culturalmente por los indígenas y se ha fusionado en sus parcelas en compañía de otras plantas (Moguel y Toledo, 1996), dando como resultado una riqueza biocultural (Moreno-Calles *et al.*, 2013).

Numerosos estudios han revelado el valor de los árboles en el cultivo de café, tal como la conservación de la biodiversidad asociada (Macip-Rios y Casas-Andreu, 2008). La combinación de cafetales tradicionales y zonas de gran valor biológico genera esquemas productivos con alto valor de conservación, como lo encontrado en cafetales ubicados en bosques mesófilos en Veracruz, que conservan hasta 89% de las especies de todos los grupos biológicos (Manson *et al.*, 2018)

Los cafetales ubicados en la Sierra Madre de Chiapas se establecieron bajo la sombra de bosques primarios, algunos desde la década de 1930 y 1940 (Venegas-Sandoval *et al.*, 2020) conservando gran parte de las especies arbóreas nativas (CONABIO, 2015). Considerando lo anterior, el presente trabajo caracterizó el dosel arbóreo con la hipótesis de que, la estructura presenta cambios a lo largo del gradiente, tal como ocurre en los bosques nativos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región sureste de la Sierra Madre de Chiapas, limítrofe con Guatemala, dentro del municipio de Motozintla; los cafetales del área de estudio con coordenada central 566515.64 m E, 1691655.35 m N, son en su totalidad cafetos de la especie arábica (*Coffea arabica* L), cultivados de forma tradicional bajo sombra de árboles nativos y cultivados de interés agrícola (Figura 1).

En dicho municipio los cafetales se distribuyen en un rango de altitud entre 2,000 y 800 msnm; aunque gradualmente los cafetales van migrando a mayores alturas. Para contrastar diferencias entre los estratos arbóreos que se establecieron en diferentes tipos de vegetación, este rango de altitud se dividió en tres intervalos para su comparación y fueron: inferior de 800 a 1200 msnm, intermedio de 1,200 a 1,600 msnm y superior entre 1,600 a 2,000 msnm.

La región de estudio se encuentra en una región donde la precipitación media anual oscila entre 3,000 y 3,500 mm (INEGI, 2006). La temperatura promedio anual es de 20, 22 y 24 °C en el intervalo superior, intermedio e inferior respectivamente (INEGI, 2007). La vegetación nativa bajo el cual se establecieron los cafetales eran distintos en cada intervalo. En el superior los cafetales se entrelazan con bosques mesófilos de montaña, en el intermedio con bosques de pino-encino y selva baja caducifolia y en la parte baja con árboles propios de la selva mediana perennifolia (INEGI, 2017).

Actualmente la estructura productiva de los cafetales también es distinta entre rangos de altitud. En la parte baja se cultivan exclusivamente variedades resistentes a la roya anaranjada del café (*Hemileia vastatrix* Berk and Br) del grupo de los catimores; las partes intermedias y altas se cultivan estas mismas pero mezcladas con variedades susceptibles debido a su mayor calidad en taza, pertenecientes al grupo de los típicas y bourbones (WCR, 2023).

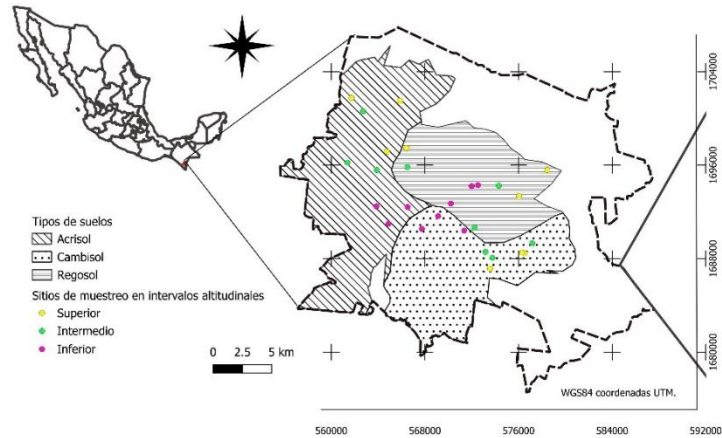


Figura 1. Ubicación de la región de estudio, tipos de suelos y parcelas de muestreo, en Motozintla, Chiapas.

## Metodología

Para el levantamiento de datos en campo se establecieron al azar 9 parcelas circulares de 2,000 m<sup>2</sup> en cada intervalo altitudinal (27 en total). En cada parcela se midió el diámetro normal (cm) con cinta diamétrica Forestry Suppliers® 283d a los individuos que arrojaran sombra, incluyendo árboles y palmas. Cada individuo fue identificado taxonómicamente con apoyo de especialistas en la plataforma Inaturalistmx (InaturalistMX, 2013), consultando literatura especializada y corroborado en World Flora Online (WFO, 2024). Para los cálculos se utilizaron las fórmulas de la Tabla 1.

Con el esfuerzo de muestreo realizado (27 parcelas) fue suficiente para cubrir más del 90% de la riqueza de especies arbóreas (Fórmula 1) en cada uno de los intervalos altitudinales, esto acorde al método de “cobertura de muestra basada en la rarefacción y extrapolación” (Chao y Jost, 2012). Los cálculos se realizaron con el programa informático en línea iNEXT versión 2024 (Chao *et al.*, 2024).

Al obtenerse la cobertura de muestreo de cada rango altitudinal, se extrapoló al valor más alto de los tres, que fue al 96.7% con un 95% de confianza. Lo anterior debido a que la riqueza de especies entre rangos altitudinales solo puede

compararse si los tres valores de riqueza están extrapolados al mismo % de cobertura de muestreo (Chao y Jost, 2012).

Los valores de diversidad alfa con el índice de Shannon-Wiener (Fórmula 2) se calcularon usando los valores de riqueza de especies en el programa informático Species-richness Prediction And Diversity Estimation in R (SPADE) (Chao *et al.*, 2016). Para el cálculo de la diversidad alfa en dicho software se utilizaron las opciones de “diversity profile estimación” y “Entropy Shannon”. Los resultados incluyeron el estimador “Bias-corrected Shannon Diversity Estimator” que corrige errores de submuestreo y se obtuvieron con intervalos de confianza del 95% usando un método de Bootstrap ya incluidos en el software (Chao y Shen, 2003).

Es importante mencionar que usualmente la diversidad alfa se expresa con el índice de Shannon-Wiener, sin embargo, estos valores no miden directamente la diversidad, sino que es una medida de la incertidumbre o de la entropía (Moreno *et al.*, 2011). Por lo anterior, además del índice de Shannon-Wiener, se calculó el número efectivo de especies o diversidad verdadera propuesto por Hill (1973).

El número efectivo de especies a diferencia de los índices de Shannon-Wiener cumplen con los principios de duplicación y replicación, características que no tienen los otros índices (Fórmula 3) (Jost, 2007).

Para comprender la importancia de utilizar el número efectivo de especies, Moreno *et al* (2011), lo ejemplifica de la siguiente manera: “Si una comunidad tiene una diversidad  $H'$  de 2.85, al convertirlo en  $\exp(H')$ , se obtendría un número efectivo de especies ( ${}^1D$ ) de 17.29 especies”. En otras palabras, la diversidad de dicho sitio sería lo equivalente a 17.29 especies igualmente abundantes.

El cálculo de la diversidad beta (fórmula 4) entre rangos de altitud se obtuvo con un dendrograma Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Means (UPGMA), con el coeficiente de Jaccard (fórmula 4) y construido con el software PAST versión 4.17 (Hammer *et al.*, 2001).

Para la estructura horizontal se calcularon el área basal por hectárea (formula 5) y densidad de individuos por hectárea (formula 6). A los resultados se le aplicaron los supuestos de normalidad y varianza para estadística paramétrica (Flores-Ruiz *et al*, 2017), y se contrastaron con un análisis de varianza bajo un diseño estadístico de bloques al azar con un 95% de confianza utilizando el programa IBM SPSS Statistics versión 22 (IBM, 1989).

Para conocer la importancia ecológica de las especies arbóreas en los intervalos altitudinales se elaboró el Índice de Valor de Importancia (fórmula 7) (Alanís *et al.*, 2020).

Tabla 1. Variables y fórmulas utilizadas para análisis del dosel arbóreo utilizado como sombra en cafetales

#### Fórmula 1

Riqueza de especies (q=0) (Chao y Jost, 2012)

$$\hat{C} = 1 - \frac{f_1}{n} \left[ \frac{(n-1)f_1}{(n-1)f_1 + 2f_2} \right]$$

Dónde:

$\hat{C}$  = estimación de cobertura de muestra (%)

$f_1$  = singletons

$f_2$  = doubletons

n = número de individuos observados

#### Fórmula 2.

Diversidad alfa (q=2).

Índice de Shannon-Wiener (Shannon and Wiener, 1964)

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \times (\ln p_i)$$

Dónde:

$H'$  = Índice de Shannon-Wiener

$p_i$  = Proporción de las especies  $p_i = (n_i \times N^{-1})$

ln = Logaritmo natural

$n_i$  = Número de individuos de la especie  $i$

n = Número total de individuos

Fórmula 3.

Diversidad alfa (q=2).  
Número efectivo de especies (Moreno *et al.*,  
2011)

$$D^1 = \exp (H')$$

Dónde:

D<sup>1</sup>= Número efectivo de especies o diversidad  
de orden uno (q=1)

H' = Índice de Shannon-Wiener

Fórmula 4.

Diversidad beta.  
Coeficiente de Jaccard (Moreno, 2001)

$$I_j = \frac{c}{a+b-c}$$

Dónde:

I<sub>j</sub> = Coeficiente de Jaccard

c = Especies presentes en ambos intervalos

a = Especies presentes en intervalo a

b = Especies presentes en el intervalo b

Fórmula 5

Estructura horizontal.

Área basal por hectárea (Alanís *et al.*, 2020)

$$AB_{ha} = \left[ \sum_{i=1}^{ni} \left( \frac{\pi}{4} x dn^2 \right) \right] x n$$

Dónde:

AB<sub>ha</sub> = área basal por hectárea (m<sup>2</sup>/ha)

dn = diámetro normal (m)

n = 10,000 m<sup>2</sup>/ superficie de la parcela de  
muestreo (m<sup>2</sup>)

#### Fórmula 6

Densidad de individuos por hectárea.

$$d_{ha} = \left( n_p \times \left( \frac{10,000 \text{ m}^2}{t} \right) \right)$$

Dónde:

$d_{ha}$  = densidad individuos por hectárea  
(individuos/ha)

$n_p$  = individuos observados en parcela de  
muestreo

$t$  = tamaño de la parcela de muestreo ( $\text{m}^2$ )

#### Fórmula 7.

Índice de valor de importancia (Curtis y  
McIntosh, 1951).

$$IVI = \frac{\sum_{i=1}^{i-1} (AR_i \times DR_i \times FR_i)}{3}$$

Donde:

IVI = Índice de Valor de Importancia

$AR_i$  = Abundancia relativa

$DR_i$  = Dominancia relativa

$FR_i$  = Frecuencia relativa

## RESULTADOS

### Riqueza de especies

En total se registraron 1736 individuos arbóreos que corresponden a 146 especies (Tabla 2). A nivel de intervalos se encontraron 782 individuos arbóreos correspondientes a 90 especies en el inferior. Dicha cantidad de especies significó una cobertura del 96.42%, esto implica que el muestreo logró registrar el 96.42% de las especies presentes en el intervalo y solamente quedaron sin registrar el 3.6% de especies arbóreas.

En el rango intermedio se registraron 457 individuos arbóreos, que pertenecen a 59 especies. Esto equivale a una cobertura de muestreo del 96.73%.

En el intervalo superior se encontraron 497 individuos arbóreos correspondientes a 82 especies, equivalente a una cobertura de muestreo de 94.98%.

De acuerdo con el método de cobertura basada en rarefacción y extrapolación, la comparación de riqueza de especies debe realizarse en una misma cobertura, y se debe extrapolar al mayor valor (Chao y Jost., 2012). Por lo tanto, para contrastar la riqueza de especies de los intervalos altitudinales, se extrapoló la cobertura al 96.73%.

En números absolutos, la riqueza promedio estimada para el intervalo inferior fue de 91 especies, para el intervalo intermedio fue de 59 y para el superior fue de 91. Con estos datos es posible obtener una relación de riqueza entre intervalos y podemos decir que el rango inferior y superior tienen una relación igual de riqueza de especies (1:1) pero el rango inferior y superior tienen 1.54 más especies que el intermedio (Figura 2).

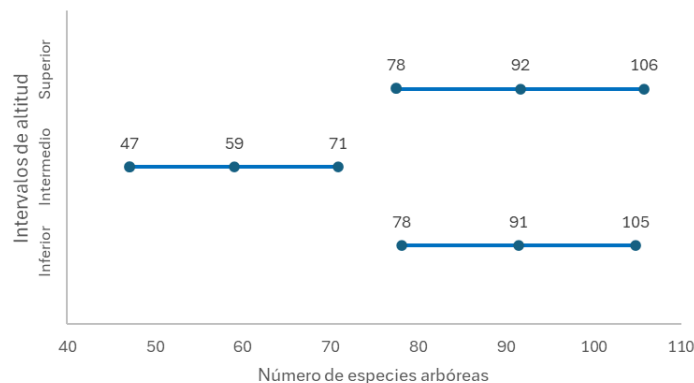


Figura 2. Intervalos de la riqueza de especies arbóreas al 96.73% de cobertura de muestra en los rangos de altitud estudiados en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas.

Tabla 2. Listado de árboles de sombra presentes en los cafetales en los intervalos superior (1), intermedio (2) e inferior (3).

N°	Nombre científico	Intervalos				N°	Nombre científico	Intervalos			
		1	2	3	Total			1	2	3	Total
1	<i>Acaciella agustissima</i> (Mill.) Britton y Rose			1	1	74	<i>Inga inicuil</i> Schltdl. And Cham. Ex G. Don	1			1
2	<i>Aiouea areolata</i> (Lundell) R. Rhode	2		4	6	75	<i>Inga paterno</i> Harms	25	2	5	32

3	<i>Alchornea latifolia</i> Sw	1	2	2	5	76	<i>Inga punctata</i> Harms	15	31	11	57
4	<i>Alnus acuminata</i> Kunth				7	77	<i>Inga vera</i> Willd	46	127	49	222
5	<i>Alostonia longifolia</i> (A. DC.) Pichon	1			1	78	<i>Lasianthaea fruticosa</i> (L) K.M. Becker		1	1	2
6	<i>Anacardium occidentale</i> L	2			2	79	<i>Lepidaploa polyploea</i> (S.F. Blake) H. Rob			7	7
7	<i>Annona cherimola</i> Mill	1		1	2	80	<i>Lippia myriocephala</i> Schtdl and Cham	1		8	9
8	<i>Annona muricata</i> L	5	1		6	81	<i>Lonchocarpus heptaphyllus</i> (Poir.) DC	54	2		56
9	<i>Aphananthe monoica</i> (Hemsl) J-F. Leroy		1	1	2	82	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i> Donn. Sm	5			5
10	<i>Ardisia compressa</i> (Kunth)		2	6	8	83	<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth	1			1
11	<i>Ardisia paschalis</i> Donn.Sm	5			5	84	<i>Machaerium</i> sp	6			6
12	<i>Ardisia verapazensis</i> Donn.Sm				1	85	<i>Malvaceae</i>			1	1
13	<i>Averrhoa carambola</i> L	1			1	86	<i>Manguifera indica</i> L	4	1	2	7
14	<i>Bambusa vulgaris</i> Schrad ex J.C Wendl Var. Vulgaris	1			1	87	<i>Matayba oppositifolia</i> Britton	5			5
15	<i>Bixa orellana</i> L	2			2	88	<i>Miconia xalepensis</i> (Bonpl.) M. Gómez		9		9
16	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	4			4	89	<i>Montanoa hibiscifolia</i> Benth			2	2
17	<i>Brugmansia aurea</i> Lagerh				1	90	<i>Muntigia calabura</i> L			1	1
18	<i>Bunchosia guatemalensis</i> Nied	8			8	91	<i>Musa x paradisiaca</i> L	63	15	9	87
19	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth				1	92	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br. Ex Roem. And Schult			3	3
20	<i>Calliandra houstoniana</i> (Mill.) Standl	2			2	93	<i>Ocotea sinuata</i> (Mez) Rohwer	8			8
21	<i>Carica papaya</i> L				1	94	<i>Oreopanax echinops</i> (Schtdl. And Cham.)			4	4
22	<i>Casimiroa edulis</i> La Llave				2	95	<i>Oreopanax sanderianus</i> Hemsl.	1		1	2
23	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	3	3		6	96	<i>Ostrya virginiana</i> (Mill.) K. Koch			14	14
24	<i>Cedrela odorata</i> L	27			27	97	<i>Persea americana</i> Mill.	9	5	25	39
25	<i>Cestrum guatemalense</i> Francey	1		1	2	98	<i>Perymenium grande</i> Hemsl.	1	3	6	10
26	<i>Cestrum nocturnum</i> L	4			4	99	<i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl	4			4
27	<i>Cestrum tomentosum</i> L.F		2		2	100	<i>Pinus devoniana</i> Lindl		4		4
28	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm	221	7	4	232	101	<i>Pinus maximoi</i> Lindl		1	23	24
29	<i>Chionantus</i> sp	1			1	102	<i>Pinus teocote</i> Schied. Ex. Schtdl. And Cham.			7	7
30	<i>Chrysophyllum cainito</i> Brandege ex Standl	7			7	103	<i>Piper aduncum</i> L	1			1
31	<i>Citrus deliciosa</i> Ten	1			1	104	<i>Piper auritum</i> Kunth	2			2
32	<i>Citrus x aurantium</i> L	2			2	105	<i>Platymiscium dimorphandrum</i> Donn. SM	1			1
33	<i>Citrus x limmeta</i> L	4	1		5	106	<i>Podachaenium eminens</i> (Lag.) Sch.Bip.			2	2
34	<i>Citrus x limon</i> Risso (L.) Osbek	2			2	107	<i>Prunus</i> sp			3	3
35	<i>Citrus x limonia</i> (L.) Osbek		7	1	8	108	<i>Psidium guajaba</i> (Mart. Ex Dc.) Landrum	2	7	2	11
36	<i>Citrus x medica</i> L	11	5	5	21	109	<i>Quercus acutifolia</i> Née		1		1
37	<i>Clethra pachecoana</i> standl and Steyerm	2	4	9	15	110	<i>Quercus segoviensis</i> Liebm			3	3
38	<i>Clibadium arboreum</i> Donn. Sm.				1	111	<i>Quercus calophylla</i> Schtdl and Cham.	3	12		15
39	<i>Coccoloba</i> sp	3			3	112	<i>Quercus peduncularis</i> Née	3			3
40	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz and Pav) Oken	9	1		10	113	<i>Quercus sapotifolia</i> Liebm.	5	1		6

41	<i>Cordia collococca</i> L	12	6	3	21	114	<i>Quercus skinneri</i> Benth.		3	3
42	<i>Coussapoa purpussi</i> Standl			6	6	115	<i>Quercus vicentensis</i> Trel.	3	7	10
43	<i>Crateva tapia</i> L	2			2	116	<i>Ricinus communis</i> L	1		1
44	<i>Critonia morifolia</i> (Mill.) r.M. King	25	43	11	79	117	<i>Rubiaceae</i>	2		2
45	<i>Croton draco</i> Schlttdl		6	8	14	118	<i>Rubiaceae 2</i>		1	1
46	<i>Croton guatemalensis</i> Lotsy	3		1	4	119	<i>Sapindus saponaria</i> L	3		3
47	<i>Cupania dentata</i> Moc. And Sessé	8	9	3	20	120	<i>Saurauia kegeliana</i> Schlecht.	2	29	31
48	<i>Dendropanax arboreus</i> (L) Decne.	2		4	6		<i>Saurauia madrensis</i> B.T. Keller and Breedlove		1	1
49	<i>Diphyssa americana</i> (Mill.) M. Sousa	1	7	9	17	122	<i>Sideroxylon capiri</i> Pittier	2		2
50	<i>Dombeya x cayeuxii</i> André		1		1		<i>Sinclairia andrieuxii</i> (DC.) H. Rob. And Brettell	1	6	7
51	<i>Eremosia leiocarpa</i> (Dc.) Gleason			6	6	124	<i>Solanum aphyodendron</i> S. Knapp	1		1
52	<i>Eremosia triflosculosa</i> Gleason	13	2		15	125	<i>Solanum mauritianium</i> Scop	1	6	14
53	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	4	13	9	26	126	<i>Spondias purpurea</i> L	1	1	2
54	<i>Erythrina americana</i> Mill.	2		1	3	127	<i>Symplocos limoncillo</i> Bonpl.		4	4
55	<i>Erythroxylum macrophyllum</i> Cav.	1			1	128	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	11	1	1
56	<i>Eugenia axillaris</i> G. Don	6			6	129	<i>Tabebuia rosea</i> DC.	3		3
57	<i>Eugenia sp</i>	5			5	130	<i>Tabernaemontana donnell smithii</i> Rose	2		2
58	<i>Eysenhardtia adenostylis</i> Baill.		4	2	6		<i>Terminalia oblonga</i> (Ruiz and Pav.) Steud.	5		5
59	<i>Fabaceae</i>	2			2		<i>Terstroemia tepezapote</i> Schlttdl. And Cham.		3	3
60	<i>Ficus aurea</i> Nutt	5	1		6	133	<i>Theobroma cacao</i> L	8		8
61	<i>Ficus sp</i>			1	1	134	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	1	14	15
62	<i>Frangula discolor</i> (Donn.sm) Grubov			2	2	135	<i>Trichilia martiana</i> C. DC.	6	1	7
63	<i>Fuchsia paniculata</i> Lindl			4	4	136	<i>Trichilia sp</i>		1	1
64	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq) Kun	1		3	4	137	<i>Trichospermum mexicanum</i> (DC.) Baill.	11		11
65	<i>Gonzalagunia tacanensis</i> Lundell		3		3	138	<i>Turpinia sp</i>		1	1
66	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	3			3	139	<i>Ulmus mexicana</i> Planch	3	2	5
67	<i>Hauya elegans</i> Moc. And Sessé ex Dc.		1		1		<i>Urera caracasana</i> (Jacp.) Gaudich. ex Griseb	1	2	2
68	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs		3	4	7	141	<i>Verbesina sp</i>		3	2
69	<i>Heliolepis donnellsmithii</i> Rose	4	5		9	142	<i>Vernonanthura patens</i> (Kunth) H. Rob	3	15	17
70	<i>Hesperocyparis lusitanica</i> (Mill.) Bartel		3	7	10	143	<i>Viburnum hartwegii</i> Benth	1	14	6
71	<i>Hymenea coubaril</i> L	1			1	144	<i>Wimmeria concolor</i> Schlttdl. And Cham.		1	1
72	<i>Inga calderonii</i> Standl	1			1	145	<i>Witheringia solanacea</i> L'Hér.	1	9	1
73	<i>Inga edulis</i> Mart.	5			5	146	<i>Yucca gigantea</i> Lem	32	11	45
									88	

## Diversidad alfa

Los valores de diversidad alfa medidos con el índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ), fueron de 3.36, 3.24 y 3.90 en el intervalo inferior, intermedio y

superior. En la Figura 3, se muestran los promedios y los intervalos obtenidos con la técnica de bootstrap (Ledezma, 2008) que incluye el software SPADE al 95% de probabilidad (Chao *et al*, 2016). El intervalo superior fue significativamente mayor.

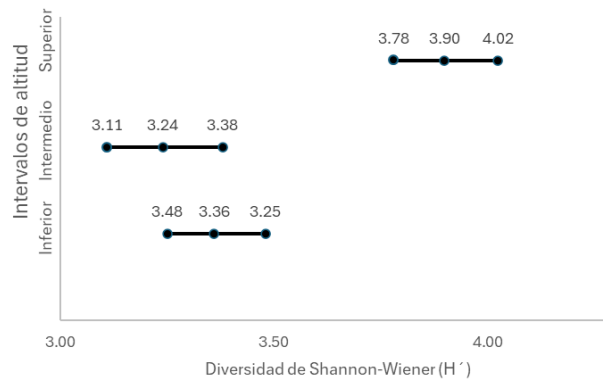


Figura 3. Diversidad alfa (Shannon-Wiener) de los árboles de sombra en los tres intervalos de altitud estudiados, obtenidos con la técnica de Bootstrap y el software SPADE.

La diversidad expresada en “número efectivo de especies”(Jost, 2006), permite contrastar la diversidad en cantidades comprensibles entre los intervalos de altitud. En este trabajo el intervalo inferior tiene una diversidad equivalente a 29 especies equitativamente abundantes, el intermedio a 26 especies igualmente equitativas y el superior a 50 (Figura 4). Con estos datos es posible comparar entre intervalos: el superior es en promedio 1.72 más diverso que el inferior y 1.92 más diverso que el intermedio.

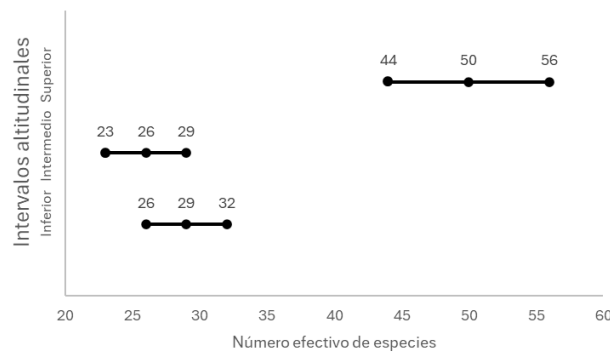


Figura 4. Diversidad de los árboles de sombra expresado en número efectivo de especies, por intervalo altitudinal.

## Diversidad beta o similitud de especies

La similitud de especies entre intervalos de altitud, evaluado con el dendrograma UPGM muestra que los intervalos intermedio y superior comparten 40% de las especies. Estos dos primeros intervalos en comparación con el intervalo inferior comparten el 28% de especies (Figura 5).

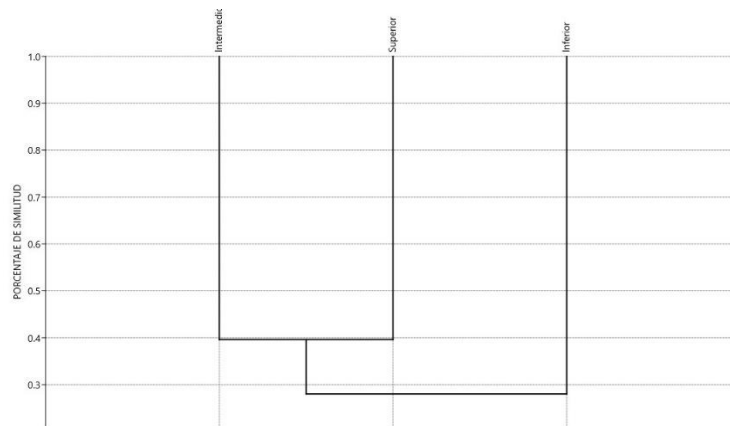


Figura 5. Dendrograma de similitud de especies entre intervalos de altitud

## Estructura

Las densidades de individuos arbóreos por hectárea, analizados bajo un análisis de varianza al 95% de confianza y con un diseño estadístico de bloques al azar, no mostraron diferencias significativas entre rangos de altitud ( $p=0.07$ ). La densidad expresada en individuos por hectárea para el intervalo inferior fue de  $434 \pm 251$  ind/ha (media  $\pm$  desviación estándar), para el intervalo intermedio fue de  $254 \pm 80$  ind/ha y en el intervalo superior fue de  $276 \pm 195$  ind/ha (Figura 6).

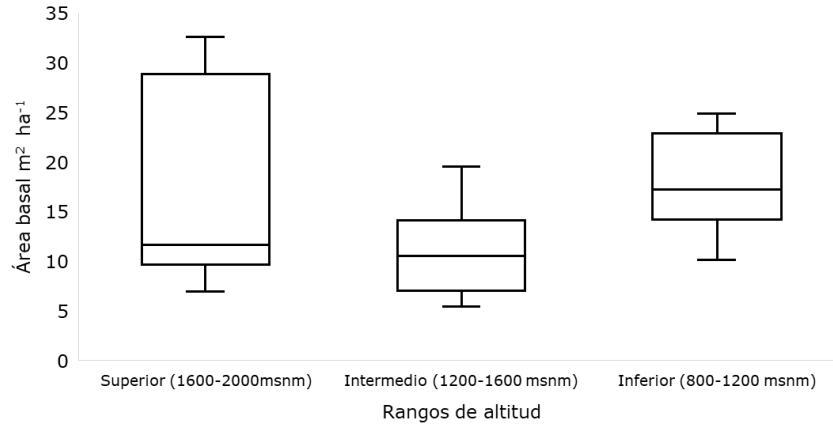


Figura 6. Distribución de los valores de área basal de los árboles de sombra en los tres intervalos altitudinales estudiados.

Al graficar la distribución de los árboles en sus categorías diamétricas, se muestra claramente que en casi todas las categorías diamétricas (cm) el rango inferior tiene más individuos por hectárea (Figura 7).

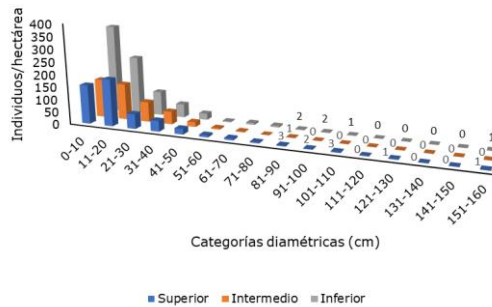


Figura 7. Distribución en clases diamétricas en centímetros de los árboles de sombra de los cafetales, en los intervalos de altitud estudiados.

Los resultados de área basal por hectárea analizados bajo un análisis de varianza al 95% de confianza y con un diseño estadístico de bloques al azar, presentaron diferencias significativas donde los intervalos inferior y superior fueron mayores que el intermedio ( $p=0.04$ ). En el inferior el área basal fue de  $17.97 \pm 4.9 \text{ m}^2/\text{ha}$  (media  $\pm$  desviación estándar) en el intermedio fue de  $10.91 \pm 4.5 \text{ m}^2/\text{ha}$  y en el superior fue de  $17.05 \pm 10 \text{ m}^2/\text{ha}$  (Figura 8).

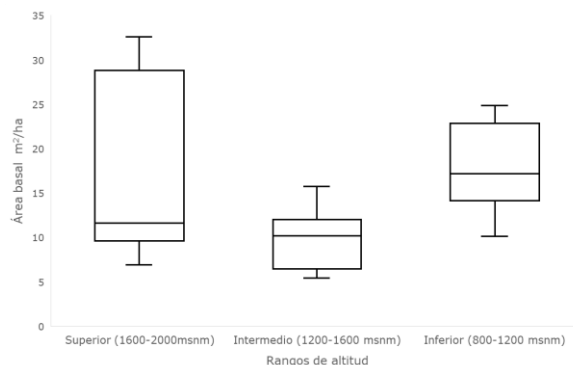


Figura. 8. Área basal de los árboles de sombra en cafetales, por intervalos de altitud estudiados.

### Índice de Valor de Importancia (IVI)

El orden que siguieron los valores ponderados de abundancia, dominancia y frecuencia nos ayudó a determinar las especies de mayor importancia ecológica entre los intervalos altitudinales.

Para el intervalo superior se encontró que *Pinus maximinoi* H. E. Moore (pino colorado) es la especie de mayor valor ecológico, debido a sus valores altos de dominancia (Tabla 3). Para el intervalo intermedio se encontró que la especie de mayor importancia ecológica fue el chalún (*Inga vera* Willd.) por su dominancia, abundancia y frecuencia (Tabla 4). Para el intervalo inferior se encontró que la pacaya (*Chamaedorea tepejilote* Liebm.) que es una palma, fue la de mayor abundancia y dominancia (Tabla 5).

Tabla 3. Índice de valor de importancia del intervalo superior

No	Especie	n	Abundancia relativa	Dominancia relativa	Frecuencia relativa	I.V.I
1	<i>Pinus maximinoi</i> Lindl	34	6.84	25.10	2.65	34.59
2	<i>Inga vera</i> Willd	52	10.46	6.10	4.64	21.20

3	<i>Yucca gigantea</i> Lem	48	9.66	2.63	1.32	13.61
4	<i>Persea americana</i> Mill.	28	5.63	2.30	4.64	12.57
5	<i>Saurauia kegeliana</i> Schlecht.	30	6.04	2.75	2.65	11.43
6	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	17	3.42	3.16	3.31	9.90
7	<i>Pinus teocote</i> Schied. Ex. Schtdl. And Cham.	7	1.41	6.80	1.32	9.54
8	<i>Vernonanthura patens</i> (Kunth) H. Rob	15	3.02	1.07	4.64	8.73
9	<i>Quercus vicentensis</i> Trel.	19	3.82	3.12	1.32	8.27
10	<i>Malvaceae subfamilia grewioideae</i>	1	0.20	6.55	0.66	7.42
11	<i>Ulmus mexicana</i> Planch	2	0.40	5.25	1.32	6.97
12	<i>Solanum mauritianium</i> Scop	18	3.62	0.68	2.65	6.95
13	<i>Quercus calophylla</i> Schtdl and Cham.	9	1.81	3.49	1.32	6.63
14	<i>Aiouea areolata</i> (Lundell) R. Rhode	3	0.60	4.42	1.32	6.35
15	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	9	1.81	0.47	3.31	5.59
16	<i>Critonia morifolia</i> (Mill.) r.M. King	13	2.62	0.88	1.99	5.48
17	<i>Inga punctata</i> harms	11	2.21	1.62	1.32	5.16
18	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M. Sousa	11	2.21	0.74	1.99	4.94
19	<i>Musa x paradisiaca</i> L	9	1.81	0.45	2.65	4.91
20	<i>Clethra pachecoana</i> standl and Steyerm	10	2.01	0.85	1.99	4.84
21	<i>Alnus acuminata</i> Kunth	7	1.41	2.59	0.66	4.66
22	<i>Lippia myriocephala</i> Schtdl and Cham	8	1.61	0.79	1.99	4.38
23	<i>Hesperocyparis lusitanica</i> (Mill.) Bartel	7	1.41	1.35	1.32	4.09
24	<i>Alchornea latifolia</i> Sw	3	0.60	2.26	0.66	3.52
25	<i>Dendropanax arboreus</i> (L) Decne.	4	0.80	2.01	0.66	3.48
26	<i>Lepidaploa polypleura</i> L	6	1.21	0.24	1.99	3.44
27	<i>Ostrya virginiana</i> (Mill.) K. Koch	4	0.80	0.62	1.99	3.41
28	<i>Inga paterno</i> Harms	6	1.21	0.21	1.99	3.40
29	<i>Croton draco</i> Schtdl	8	1.61	1.13	0.66	3.40
30	<i>Oreopanax echinops</i> (Schtdl. And Cham.)	5	1.01	0.31	1.99	3.30
31	<i>Coussapoa purpussi</i> Standl	6	1.21	1.38	0.66	3.25
32	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz and Pav) Oken	3	0.60	0.90	1.32	2.82
33	<i>Viburnum hartwegii</i> Benth	3	0.60	0.10	1.99	2.69
34	<i>Symplocos limoncillo</i> Bonpl.	4	0.80	1.08	0.66	2.55
35	<i>Perymenium grande</i> Hemsl.	6	1.21	0.58	0.66	2.45
36	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	4	0.80	0.07	1.32	2.20
37	<i>Erythrina americana</i> Mill.	1	0.20	1.02	0.66	1.88
38	<i>Montanoa sp</i>	2	0.40	0.03	1.32	1.76
39	<i>Urera caracasana</i> (Jacq.) Gaudich. ex Griseb	2	0.40	0.03	1.32	1.75
40	<i>Verbesina sp</i>	2	0.40	0.01	1.32	1.74
41	<i>Eysenhardtia adenostylis</i> Baill.	2	0.40	0.66	0.66	1.73
42	<i>Fuchsia paniculata</i> Lindl	2	0.40	0.51	0.66	1.57
43	<i>Prunus sp</i>	3	0.60	0.29	0.66	1.55
44	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm	4	0.80	0.07	0.66	1.53
45	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br. Ex Roem. And Schult	3	0.60	0.26	0.66	1.53

46	<i>Quercus skinneri</i> Benth.	3	0.60	0.25	0.66	1.51
47	<i>Citrus x medica</i> L	3	0.60	0.07	0.66	1.34
48	<i>Gliricidia sepium (jacq)</i> Kun	3	0.60	0.01	0.66	1.28
49	<i>Rubiaceae 2</i>	1	0.20	0.41	0.66	1.27
50	<i>Podachaenium eminens (Lag.)</i> Sch.Bip.	2	0.40	0.20	0.66	1.27
51	<i>Manguifera indica</i> L	2	0.40	0.19	0.66	1.25
52	<i>Byrsonima crassifolia (L.)</i> Kunth	1	0.20	0.26	0.66	1.13
53	<i>Frangula discolor (Donn.sm)</i> Grubov	1	0.20	0.23	0.66	1.09
54	<i>Witheringia solanacea</i> L'Hér.	2	0.40	0.00	0.66	1.07
55	<i>Citrus x limonia (L.)</i> Osbek	1	0.20	0.16	0.66	1.02
56	<i>Spondias purpurea</i> L	1	0.20	0.16	0.66	1.02
57	<i>Terstroemia tepezapote</i> Schltld. And Cham.	1	0.20	0.15	0.66	1.01
58	<i>Ficus</i> sp	1	0.20	0.12	0.66	0.99
59	<i>Aphananthe monoica (Hemsl)</i> J-F. Leroy	1	0.20	0.10	0.66	0.97
60	<i>Lasianthaea fruticosa (L)</i> K.M. Becker	1	0.20	0.10	0.66	0.97
61	<i>Clibadium arboreum</i> Donn. Sm.	1	0.20	0.08	0.66	0.95
62	<i>Sinclairia andrieuxii (DC.)</i> H. Rob. And Brettell	1	0.20	0.07	0.66	0.93
63	<i>Acaciella agustissima (Mill.)</i> Britton y Rose	1	0.20	0.06	0.66	0.92
64	<i>Cestrum guatemalense</i> Francey	1	0.20	0.06	0.66	0.92
65	<i>Citrus x aurantium</i> L	1	0.20	0.06	0.66	0.92
66	<i>Saurauia madrensis</i> B.T. Keller and Breedlove	1	0.20	0.06	0.66	0.92
67	<i>Annona cherimola</i> Mill	1	0.20	0.04	0.66	0.91
68	<i>Quercus sapotifolia</i> Liebm.	1	0.20	0.04	0.66	0.90
69	<i>Carica papaya</i> L	1	0.20	0.03	0.66	0.90
70	<i>Eremosis leiocarpa (Dc.)</i> Gleason	1	0.20	0.03	0.66	0.89
71	<i>Turpinia</i> sp	1	0.20	0.03	0.66	0.89
72	<i>Casimiroa edulis</i> La Llave	1	0.20	0.02	0.66	0.89
73	<i>Quercus segoviensis</i> Liebm	1	0.20	0.02	0.66	0.88
74	<i>Ardisia verapazensis</i> Donn.Sm	1	0.20	0.02	0.66	0.88
75	<i>Syzygium jambos (L.)</i> Alston	1	0.20	0.02	0.66	0.88
76	<i>Croton guatemalensis</i> Lotsy	1	0.20	0.01	0.66	0.88
77	<i>Muntigia calabura</i> L	1	0.20	0.01	0.66	0.87
78	<i>Brugmansia aurea</i> Lagerh	1	0.20	0.00	0.66	0.87
79	<i>Psidium guajaba (Mart. Ex Dc.)</i> Landrum	1	0.20	0.00	0.66	0.87
80	<i>Wimmeria concolor</i> Schltld. And Cham.	1	0.20	0.00	0.66	0.87
81	<i>Cupania dentata</i> Moc. And Sessé	1	0.20	0.00	0.66	0.87
82	<i>Ardisia</i> sp	1	0.20	0.00	0.66	0.87

Tabla 4. Índice de valor de importancia del intervalo intermedio

No	Especie	n	Abundancia relativa	Dominancia relativa	Frecuencia relativa	I.V.I
1	<i>Inga vera</i> Willd	126	27.57	37.56	7.89	73.03
2	<i>Critonia morifolia</i> (Mill.) r.M. King	44	9.63	2.79	7.02	19.44
3	<i>Inga punctata</i> harms	34	7.44	5.22	6.14	18.80
4	<i>Yucca gigantea</i> Lem	11	2.41	4.48	3.51	10.40
5	<i>Viburnum hartwegii</i> Benth	19	4.16	3.42	2.63	10.21
6	<i>Trichospermum mexicanum</i> (DC.) Baill.	10	2.19	6.17	0.88	9.23
7	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	15	3.28	2.68	2.63	8.60
8	<i>Cupania dentata</i> Moc. And Sessé	9	1.97	3.59	2.63	8.19
9	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M. Sousa	6	1.31	2.37	3.51	7.19
10	<i>Musa x paradisiaca</i> L	16	3.50	1.88	1.75	7.13
11	<i>Vernonanthura patens</i> (Kunth) H. Rob	14	3.06	0.71	2.63	6.41
12	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz and Pav) Oken	7	1.53	2.24	2.63	6.40
13	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	13	2.84	0.71	2.63	6.19
14	<i>Croton draco</i> Schltld	6	1.31	2.84	1.75	5.91
15	<i>Psidium guajaba</i> (Mart. Ex Dc.) Landrum	7	1.53	0.41	3.51	5.45
16	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	3	0.66	3.61	0.88	5.14
17	<i>Witheringia solanacea</i> L'Hér.	9	1.97	0.28	2.63	4.88
18	<i>Persea americana</i> Mill.	8	1.75	1.30	1.75	4.81
19	<i>Quercus vicentensis</i> Trel.	3	0.66	2.30	1.75	4.71
20	<i>Clethra pachecoana</i> standl and Steyerm	4	0.88	1.10	2.63	4.60
21	<i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose	5	1.09	0.83	2.63	4.56
22	<i>Citrus x limonia</i> (L.) Osbek	7	1.53	0.55	1.75	3.84
23	<i>Pinus devoniana</i> Lindl	4	0.88	1.78	0.88	3.53
24	<i>Solanum mauritianum</i> Scop	6	1.31	0.38	1.75	3.44
25	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm	7	1.53	0.14	1.75	3.42
26	<i>Spondias purpurea</i> L	1	0.22	1.96	0.88	3.05
27	<i>Miconia xalapensis</i> (Bonpl.) M. Gómez	7	1.53	0.63	0.88	3.04
28	<i>Quercus sapotifolia</i> Liebm.	5	1.09	1.05	0.88	3.02
29	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	3	0.66	0.06	1.75	2.47
30	<i>Quercus peduncularis</i> Née	3	0.66	0.91	0.88	2.45
31	<i>Inga paterno</i> Harms	2	0.44	0.23	1.75	2.43
32	<i>Lonchocarpus heptaphyllus</i> (Poir.) DC	2	0.44	0.16	1.75	2.35
33	<i>Eremosis triflosculosa</i> Gleason	2	0.44	0.65	0.88	1.97
34	<i>Hesperocyparis lusitanica</i> (Mill.) Bartel	3	0.66	0.37	0.88	1.91
35	<i>Aphananthe monoica</i> (Hemsl) J-F. Leroy	1	0.22	0.81	0.88	1.91
36	<i>Quercus calophylla</i> Schltld and Cham.	2	0.44	0.57	0.88	1.89
37	<i>Eysenhardtia adenostylis</i> Baill.	4	0.88	0.06	0.88	1.82
38	<i>Gonzalagunia tacanensis</i> Lundell	3	0.66	0.26	0.88	1.80
39	<i>Pinus maximinoi</i> Lindl	1	0.22	0.64	0.88	1.74
40	<i>Cestrum tomentosun</i> L.F	2	0.44	0.39	0.88	1.70

41	<i>Perymenium grande</i> Hemsl.	3	0.66	0.15	0.88	1.69
42	<i>Urera caracasana</i> (Jacq.) Gaudich. ex Griseb	2	0.44	0.31	0.88	1.63
43	<i>Verbesina</i> sp	3	0.66	0.05	0.88	1.58
44	<i>Alchornea latifolia</i> Sw	2	0.44	0.12	0.88	1.44
45	<i>Saurauia kegeliana</i> Schlecht.	2	0.44	0.09	0.88	1.40
46	<i>Quercus acutifolia</i> Née	1	0.22	0.31	0.88	1.40
47	<i>Dombeya x cayeuxii</i> André	1	0.22	0.25	0.88	1.35
48	<i>Trichilia</i> sp	1	0.22	0.25	0.88	1.35
49	<i>Manguifera indica</i> L	1	0.22	0.13	0.88	1.23
50	<i>Lasianthaea fruticosa</i> (L.) K.M. Becker	1	0.22	0.09	0.88	1.19
51	<i>Hauya elegans</i> Moc. And Sessé ex Dc.	1	0.22	0.06	0.88	1.15
52	<i>Citrus x limmeta</i> L	1	0.22	0.04	0.88	1.14
53	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	1	0.22	0.03	0.88	1.12
54	<i>Ficus aurea</i> Nutt	1	0.22	0.01	0.88	1.11
55	<i>Annona muricata</i> L	1	0.22	0.01	0.88	1.11
56	<i>Citrus x medica</i> L	1	0.22	0.01	0.88	1.11

Tabla 5. Índice de valor de importancia intervalo inferior

No	Especie	n	Abundancia relativa	Dominancia relativa	Frecuencia relativa	I.V.I
1	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm	222	28.389	3.03	3.72	35.14
2	<i>Lonchocarpus heptaphyllus</i> (Poir.) DC	56	7.161	16.03	4.79	27.98
3	<i>Ficus aurea</i> Nutt	5	0.639	13.63	1.60	15.87
4	<i>Musa x paradisiaca</i> L	63	8.056	5.39	2.13	15.57
5	<i>Inga vera</i> Willd	46	5.882	3.95	3.19	13.02
6	<i>Yucca gigantea</i> Lem	32	4.092	5.80	2.66	12.55
7	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz and Pav) Oken	21	2.685	5.33	3.72	11.74
8	<i>Cedrela odorata</i> L	28	3.581	4.21	2.13	9.92
9	<i>Inga paterno</i> Harms	26	3.325	1.68	3.19	8.20
10	<i>Critonia morifolia</i> (Mill.) r.M. King	25	3.197	0.64	2.66	6.50
11	<i>Inga punctata</i> harms	14	1.790	1.43	3.19	6.41
12	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	4	0.512	4.59	1.06	6.17
13	<i>Eremosis triflosculosa</i> Gleason	12	1.535	1.12	3.19	5.85
14	<i>Terminalia oblonga</i> (Ruiz and Pav.) Steud.	5	0.639	3.03	1.06	4.73
15	<i>Citrus x medica</i> L	11	1.407	0.77	2.13	4.30
16	<i>Aiouea areolata</i> (Lundell) R. Rhode	2	0.256	2.78	1.06	4.10
17	<i>Manguifera indica</i> L	4	0.512	1.45	2.13	4.09
18	<i>Cupania dentata</i> Moc. And Sessé	9	1.151	0.53	2.13	3.81
19	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	12	1.535	1.16	1.06	3.76
20	<i>Persea americana</i> Mill.	9	1.151	1.37	1.06	3.59

21	<i>Chrysophyllum cainito</i> Brandegee ex Standl	7	0.895	0.74	1.60	3.23
22	<i>Ulmus mexicana</i> Planch	3	0.384	1.44	1.06	2.89
23	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i> Donn. Sm	6	0.767	1.03	1.06	2.86
24	<i>Machaerium</i> sp	6	0.767	0.29	1.60	2.66
25	<i>Tabebuia rosea</i> DC.	3	0.384	0.66	1.60	2.64
26	<i>Eugenia axillaris</i> G. Don	6	0.767	1.33	0.53	2.63
27	<i>Sapindus saponaria</i> L	3	0.384	1.18	1.06	2.63
28	<i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose	4	0.512	0.41	1.60	2.52
29	<i>Bunchosia guatemalensis</i> Nied	8	1.023	0.40	1.06	2.49
30	<i>Eugenia</i> sp	5	0.639	0.21	1.60	2.45
31	<i>Hymenea coubaril</i> L	1	0.128	1.75	0.53	2.41
32	<i>Trichilia martiana</i> C. DC.	3	0.384	0.39	1.60	2.37
33	<i>Ocotea sinuata</i> (Mez) Rohwer	8	1.023	0.20	1.06	2.28
34	<i>Theobroma cacao</i> L	8	1.023	0.17	1.06	2.26
35	<i>Citrus x limmeta</i> L	4	0.512	0.14	1.60	2.25
36	<i>Matayba oppositifolia</i> Britton	5	0.639	0.53	1.06	2.24
37	<i>Oreopanax echinops</i> (Schltdl. And Cham.)	1	0.128	1.55	0.53	2.21
38	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	3	0.384	0.12	1.60	2.10
39	<i>Annona muricata</i> L	5	0.639	0.16	1.06	1.86
40	<i>Ardisia paschalis</i> Donn.Sm	5	0.639	0.67	0.53	1.84
41	<i>Crateva tapia</i> L	2	0.256	1.05	0.53	1.84
42	<i>Dendropanax arboreus</i> (L) Decne.	2	0.256	0.52	1.06	1.84
43	<i>Cestrum nocturnum</i> L	4	0.512	0.16	1.06	1.74
44	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol	2	0.256	0.35	1.06	1.67
45	<i>Rubiaceae</i>	2	0.256	0.88	0.53	1.67
46	<i>Erythrina americana</i> Mill.	2	0.256	0.78	0.53	1.56
47	<i>Bixa orellana</i> L	2	0.256	0.10	1.06	1.41
48	<i>Inga edulis</i> Mart.	5	0.639	0.24	0.53	1.41
49	<i>Tabernaemontana donnell smithii</i> Rose	2	0.256	0.07	1.06	1.39
50	<i>Citrus x limon</i> Risso (L.) Osbek	2	0.256	0.04	1.06	1.36
51	<i>Alchornea latifolia</i> Sw	1	0.128	0.61	0.53	1.27
52	<i>Clethra pachecoana</i> standl and Steyerm	2	0.256	0.46	0.53	1.25
53	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	4	0.512	0.20	0.53	1.25
54	<i>Sideroxylon capiri</i> Pittier	2	0.256	0.44	0.53	1.22
55	<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth	1	0.128	0.49	0.53	1.15
56	<i>Vernonanthura patens</i> (Kunth) H. Rob	3	0.384	0.19	0.53	1.10
57	<i>Pseudalbizzia adinocephala</i> L	2	0.256	0.31	0.53	1.09
58	<i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl	4	0.512	0.04	0.53	1.08
59	<i>Croton guatemalensis</i> Lotsy	3	0.384	0.14	0.53	1.05
60	<i>Coccoloba</i> sp	3	0.384	0.12	0.53	1.03
61	<i>Chionantus</i> sp	1	0.128	0.37	0.53	1.03
62	<i>Erythroxylum macrophyllum</i> Cav.	1	0.128	0.31	0.53	0.97
63	<i>Psidium guajaba</i> (Mart. Ex Dc.) Landrum	2	0.256	0.15	0.53	0.94

64	<i>Anacardium occidentale</i> L	2	0.256	0.05	0.53	0.84
65	<i>Citrus x aurantium</i> L	2	0.256	0.05	0.53	0.84
66	<i>Piper auritum</i> Kunth	2	0.256	0.01	0.53	0.80
67	<i>Inga calderonii</i> Standl	1	0.128	0.13	0.53	0.79
68	<i>Gliricidia sepium</i> (jacq) Kun	1	0.128	0.05	0.53	0.71
69	<i>Inga punctata</i> L	1	0.128	0.05	0.53	0.71
70	<i>Lippia myriocephala</i> Schtdl and Cham	1	0.128	0.04	0.53	0.70
71	<i>Solanum mauritianum</i> Scop	1	0.128	0.03	0.53	0.69
72	<i>Alstonia longifolia</i> (A. DC.) Pichon	1	0.128	0.02	0.53	0.68
73	<i>Averrhoa carambola</i> L	1	0.128	0.02	0.53	0.68
74	<i>Cestrum guatemalense</i> Francey	1	0.128	0.02	0.53	0.68
75	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M. Sousa	1	0.128	0.02	0.53	0.68
76	<i>Inga inicuil</i> Schtdl. And Cham. Ex G. Don	1	0.128	0.02	0.53	0.68
77	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	1	0.128	0.02	0.53	0.68
78	<i>Piper aduncum</i> L	1	0.128	0.02	0.53	0.68
79	<i>Viburnum hartwegii</i> Benth	1	0.128	0.02	0.53	0.68
80	<i>Citrus deliciosa</i> Ten	1	0.128	0.02	0.53	0.68
81	<i>Platymiscium dimorphandrum</i> Donn. SM	1	0.128	0.02	0.53	0.68
82	<i>Solanum aphyodendron</i> S. Knapp	1	0.128	0.01	0.53	0.67
83	<i>Calliandra houstoniana</i> (Mill.) Standl	1	0.128	0.01	0.53	0.67
84	<i>Ricinus communis</i> L	1	0.128	0.01	0.53	0.67
85	<i>Annona cherimola</i> Mill	1	0.128	0.01	0.53	0.67
86	<i>Bambusa vulgaris</i> Schrad ex J.C Wendl Var. Vulgaris	1	0.128	0.01	0.53	0.67
87	<i>Urera caracasana</i> (Jacp.) Gaudich. ex Griseb	1	0.128	0.01	0.53	0.67
88	<i>Witheringia solanacea</i> L'Hér.	1	0.128	0.01	0.53	0.67

## DISCUSIÓN

### Riqueza de especies arbóreas

Los datos encontrados y analizados muestran que la diversidad a nivel  $q=0$  o riqueza de especies presentó valores mayores en los rangos superior e inferior, en comparación al rango intermedio. Uno de los factores que puede explicar estos valores es el tipo de vegetación con los que se traslapan los cafetales.

El rango superior se traslapa con bosques mesófilos de montaña, que son de los ecosistemas terrestres con mayor biodiversidad (CONABIO, 2014). En esta zona de bosques mesófilos de montaña Verdugo-Morales *et al.* (2022) realizaron un

estudio y reportan que a la altura del intervalo superior se encuentra la mayor riqueza de especies con  $44 \pm 5$  especies por sitio de 1,000 m<sup>2</sup>.

Por otro lado, los cafetales del intervalo inferior se traslapan con un ecosistema de selva mediana tropical perennifolia que también es considerada de alta riqueza florística (SEMARNAT, 2014). Hay estudios que revelan que los componentes arbóreos de este ecosistema conviven fácilmente con cafetales ya que cumplen la función de sombra (García *et al.*, 2015).

Contrario a lo anterior, el intervalo intermedio que presentó la menor riqueza de especies se traslapa con bosques de pino-encino y selva baja caducifolia (INEGI, 2017). Si bien las selvas bajas tienen alta riqueza de especies y endemismos (Gallardo-Cruz *et al.*, 2005), muchas especies de este tipo de vegetación y de las asociaciones de pino-encino, al ser caducifolios no son apetecidas como sombra en los cafetales.

Por lo anterior ha ocurrido un proceso de reemplazo de especies caducifolias por el género *Inga sp.*, que ha sido promovido como sombra por excelencia para los cafetos (Jarquín, 2003) al grado de que es uno de los géneros arbóreos más comunes en los cafetales tradicionales en México (Sánchez *et al.*, 2017).

Aunado a lo anterior las asociaciones de pino-encino también registran menos riqueza de especies en contraste con bosques mesófilos de montaña y selvas medianas (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010; Méndez-Osorio *et al.*, 2018; Barrios-Calderón *et al.*, 2022).

Las especies encontradas en todo el estudio fueron 146. Esta riqueza de especies es mayor a la riqueza de especies reportada para otros cafetales tradicionales en Veracruz (Ramos *et al.*, 2020) y Guerrero (Silva-Aparicio *et al.*, 2024).

Por otro lado, en un bosque natural la riqueza de especies presenta patrones asociadas a la altitud como lo describen Ávila-Sánchez *et al.*, (2018) y Sánchez-González y López-Mata (2005); en este trabajo se consideró la posibilidad de que este patrón podría encontrarse porque al ser un cafetal bajo sombra, se conserva

gran parte de la complejidad y estructura de un bosque (Soto-Pinto *et al.*, 2001; Farfán, 2014); sin embargo no se observa patrones ascendentes o descendentes asociadas a la altitud, lo cual confirma lo encontrado por Moguel y Toledo, (1999) que no encontró correlación entre la riqueza de especies y la altitud en el dosel arbóreo en cafetales, y añaden que la diversidad existente es producto del manejo.

### **Diversidad alfa**

Los valores de diversidad alfa medido con el índice de Shannon-Wiener y con número efectivo de especies, muestran que el intervalo superior es de alta diversidad y que los intervalos intermedio e inferior son de diversidad media acorde a lo definido por Margalef (Medrano-Meraz *et al.*, 2017).

La diversidad alfa fue significativamente mayor para el intervalo superior (Figura 3) a pesar de que tiene una riqueza de especies similar al intervalo inferior (Figura 2). La mayor diversidad se debe a que el intervalo superior además de presentar alta riqueza de especies no registra especies dominantes. La especie más abundante concentró menos del 10% de los individuos arbóreos. En contraste en el intervalo inferior, la especie dominante (*Chamaedorea tepejilote*) concentró más del 28% de los individuos, lo que disminuyó dicho índice.

Acorde a lo anterior Pla (2006) y Jost (2006) mencionan que los altos valores de diversidad se obtienen con una alta riqueza de especies y que tengan equitatividad, es decir que todas las especies tengan iguales o similares abundancias.

El intervalo superior se clasifica como de alta diversidad, el intermedio e inferior como de diversidad media, acorde a la clasificación de Margalef (Medrano-Meraz *et al.*, 2017).

Los valores de diversidad de Shannon-Wiener al ser expresados en número efectivo de especies, facilitó la comprensión de las diferencias de diversidad entre

intervalos al establecer una relación de diversidad entre los intervalos (Jost, 2006).

Los resultados obtenidos de diversidad alfa ( $q=1$ ) son similares a los obtenidos en cafetales de Ixhuatlán (3.59), Amatlán (3.04) (Ramos *et al.*, 2020) y Atoyac (3.56) (García *et al.*, 2015) en Veracruz.

De igual manera los índices obtenidos son mayores que bosques nativos como el reportado por López-Hernández *et al.*, (2017) con  $H' = 1.37$  para bosques templados en Puebla;  $H' = 1.75$  para bosque mesófilo de montaña en Veracruz (García-De la Cruz *et al.*, 2013), y las nueve parcelas de bosque templado con valores de  $H'$  entre 0.99 y 2.02 (García-Aranda *et al.*, 2012).

En los ecosistemas naturales existen patrones de diversidad asociados con el gradiente de altitud (Ávila-Sánchez *et al.*, 2018; Verdugo-Morales *et al.*, 2022;). Estos patrones no se observaron en los cafetales estudiados.

### **Diversidad beta o similitud de especies**

En ecosistemas con poca intervención humana, las especies como parte de la estructura y composición de los bosques, tienden a tener altos valores de recambios en pocas diferencias de altitud, como respuesta a los factores ambientales (Mazzola *et al.*, 2008).

En el presente estudio, entre los 2,000 y 800 msnm, 28% de los árboles son similares. En cambio, en un ecosistema de bosque mesófilo de montaña que se encuentra aledaño a los cafetales estudiados, en 700 m de gradiente altitudinal solo 16% de las especies arbóreas son similares (Verdugo-Morales *et al.*, 2022). Williams *et al* (1996) reporta 10% de similitud entre un sitio ubicado a 2,050 msnm y otro a 1,250 msnm en Cofre de Perote, Veracruz.

El porcentaje mayor de similitud en estos cafetales se debe a que muchas especies arbóreas se cultivan con interés comestible, ornamental, energético, o para señalar linderos, por lo tanto, se promueve su establecimiento en todas las parcelas. Las especies más comunes son *Citrus sp*, *Inga sp*, *Musa x paradisiaca*,

*Persea americana*, *Chamaedorea tepejilote*, *Yucca gigantea* y *Critonia morifolia*, etc.

## **Estructura**

La densidad en número de árboles por hectárea se encontró que no es homogénea entre las parcelas, y está muy determinada por el manejo agrícola que le da cada productor.

La estructura horizontal de los árboles de sombra ha sufrido mucha modificación, en comparación a los bosques primarios. Esto se debe porque el cafeto debe recibir radiación solar para que pueda producir, por tanto, se regula la sombra.

En un ecosistema forestal con varios estratos arbóreos, los individuos de los estratos inferiores no reciben mucha radiación solar (Vázquez-Yanes y Orozco-Segovia, 1992). Para que el cafeto pueda producir necesita radiación solar. Entre más radiación solar reciban mayor producción de fotosintatos y mayor producción agrícola (Ramírez *et al.*, 2013).

Por lo anteriormente descrito, en los cafetales se regula la sombra, y esto influye en la estructura y densidad del arbolado. Para este trabajo se encontró que el intervalo inferior la densidad fue de  $434 \pm 251$  ind/ha (media  $\pm$  desviación estándar), en el intermedio fue de  $254 \pm 80$  ind/ha y en el superior fue de  $276 \pm 195$  ind/ha.

El manejo agrícola ha generado una amplia variabilidad en la densidad de árboles por hectárea entre las parcelas de los intervalos altitudinales, los sitios registraron coeficientes de variación de entre 30 y 70%.

En un bosque mesófilo de montaña aledaño al área de estudio, el número de árboles por hectárea presentó coeficientes de variación de 10,34 y 7% en los rangos altitudinales (Verdugo-Morales *et al.*, 2022). Esto muestra que los ecosistemas forestales no son estáticos, sino que también tienen dinamismo en sus densidades, causados por la caída de árboles y la formación de claros, que

de acuerdo con Popma *et al.*, (1988) en algunos bosques ocurre a una tasa de 1% de la superficie por año. La variabilidad de la densidad de árboles por hectárea en cafetales es mayor a la variabilidad encontrada en ecosistemas forestales.

Al comparar entre los tres gradientes de altitud, el valor promedio de densidad de individuos por hectárea es mayor en el intervalo inferior, pero debido a la gran variabilidad interna en cada estrato, no se detectaron diferencias estadísticas significativas.

En ecosistemas forestales se ha encontrado que las densidades también siguen un gradiente a lo largo de la altitud (Gairola *et al.*, 2008; Bauters *et al.*, 2017; Aguirre-Calderón *et al.*, 2022). En este estudio no se encontró un gradiente altitudinal, debido a la intervención del manejo agronómico.

Al analizar la otra variable de la estructura, el área basal por hectárea se registraron valores de  $17.97 \pm 4.9 \text{ m}^2/\text{ha}$  en el intervalo inferior, de  $10.91 \pm 4.5 \text{ m}^2/\text{ha}$  en el intermedio y  $17.05 \pm 10 \text{ m}^2/\text{ha}$  en el superior.

Los altos valores de área basal por hectárea en el intervalo inferior están relacionados a la mayor cantidad de individuos, debido a que el tipo de vegetación de selva mediana subperennifolia mantiene tres estratos arbóreos definidos. En el primer estrato se conservan los árboles de gran tamaño como *Brosimum alicastrum* Sw., *Lonchocarpus heptaphyllus* (Poir.) DC, *Ficus aurea* Nutt, *Terminalia oblonga* (Ruiz and Pav.) Steud., *Lonchocarpus minimiflorus* Donn. Sm, *Lonchocarpus rugosus* Benth, *Ocotea sinuata* (Mez) Rohwer, *Hymenea coubaril* L.

En el segundo estrato arbóreo se tienen arboles medianos como: *Inga vera* Willd, *Inga inicuil* Schltdl. And Cham. Ex G. Don, *Trema micrantha* (L.) Blume, *Cestrum guatemalense* Francey, *Guazuma ulmifolia* Lam, *Heliocarpus donnellsmithii* Rose, etc.

Junto a las plantas de cafeto existen arboles pequeños y palmas. En este tercer estrato se encuentran individuos de las especies: *Chamaedorea tepejilote* Liebm,

*Citrus sp*, *Musa x paradisiaca* L, *Witheringia solanacea* L'Hér., *Critonia morifolia* (Mill.) r.M. King, *Piper auritum* Kunth, *Averrhoa carambola* L, etc.

En el intermedio el tipo de vegetación nativo es bosque de pino-encino y selva baja caducifolia (INEGI, 2017). Muchas especies en este tipo de vegetación son caducifolias como: *Diphysa americana* (Mill.) M. Sousa, *Croton draco* Schltldl, *Heliocarpus donnellsmithii* Rose, *Aphananthe monoica* (Hemsl) J-F. Leroy, *Quercus sp*, etc. Dichas especies son de mediana y pequeñas dimensiones y eso se ve reflejado en el área basal por hectárea. Además, se ha sustituido gran cantidad de árboles nativos porque al ser caducifolias, se ha priorizado el uso de especies perennifolias como el género *Inga sp.*, que son de dimensiones medianas.

En el intervalo superior, aunque la densidad de árboles por hectárea es menor que el inferior, se registraron individuos de grandes dimensiones como: *Pinus maximinoi* Lindl, *Persea americana* Mill., *Pinus teocote* Schied. Ex. Schltldl. And Cham., *Ulmus mexicana* Planch, *Aiouea sp*, *Hesperocyparis lusitanica* (Mill.) Bartel. Lo anterior se reflejó en el área basal por hectárea.

En ecosistemas forestales el área basal también sigue una tendencia altitudinal (Kharal *et al.*, 2015; Bauters *et al.*, 2017; Aguirre-Calderón *et al.*, 2022), sin embargo, en este sistema agroforestal no se encontró este patrón lineal.

Los resultados de área basal por hectárea de este trabajo son menores a los encontrados en porciones de bosques mesófilos aledaños de 34, 53 y 55 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en intervalos superior, intermedio e inferior (Verdugo-Morales *et al.*, 2022), y menores a los 22, 27 y 25 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> reportados en cafetales tradicionales en Veracruz (García *et al.*, 2015).

### **Índice de Valor de Importancia**

En el intervalo superior la especie de mayor importancia ecológica fue *Pinus maximinoi* H.E. Moore (pino colorado). Esta especie destacó por su dominancia ya que en los sitios donde se encuentra ubicado, registró diámetros normales

superiores a los 100 cm. Esta especie tiene una estructura de copa que permite la entrada difusa de luz solar que permite la convivencia con cafetos. La presencia de esta especie en los cafetales añade valor, ya que es utilizada como recurso maderable.

En el intervalo intermedio *Inga vera* (chalun) fue la de mayor importancia, ya que fue abundante, dominante y frecuente. En este intervalo esta especie ha sido cultivada porque ha sustituido otras especies caducifolias para sombra del cafeto. Esta especie es perenne, se adapta a climas secos, genera hojarasca y se usa como leña (Reyes-Reyes *et al.* 2022; Carrera *et al.*, 2022; CONABIO, 2024).

Para el intervalo inferior la pacaya (*Chamaedorea tepejilote* Liebm) fue la de mayor importancia. Es una palma, pero proyecta sombra para los cafetos. Su importancia se debe a que es tolerada, cultivada y apreciada porque sus flores son usadas como alimento y sus hojas como ornamental (Rodríguez *et al.*, 2024), desde tiempos prehispánicos en la cultura maya (Meléndez *et al.*, 2012).

## **CAPÍTULO 2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE TRES TIPOS DE SUELOS EN ESQUEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ BAJO SOMBRA.**

### **RESUMEN**

En cafetales bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de los suelos. Para lo anterior se levantaron 27 muestras de suelos distribuidos entre tres tipos de suelos encontrados: acrisol, cambisol y regosol. Las variables comparadas fueron: densidad aparente (DA), conductividad eléctrica (CE), pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N),

fósforo(P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mg), hierro (H), cobre (Cu) y zinc (Zn). Se encontraron diferencias significativas en fósforo, cobre y hierro. Las otras propiedades fisicoquímicas no presentaron diferencias significativas. En comparación a estudios realizados para cultivo de café, se encontraron valores bajos en MO, N, Cu y Zn. Los cafetales bajo sombra mantienen niveles de nutrientes mayores a otros sistemas productivos, sin embargo, a pesar del dosel arbóreo, es necesario mejorar las actividades de manejo para mantener la sostenibilidad del esquema de producción.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos ecológicos fundamentales de los ecosistemas es el ciclo biogeoquímico o de nutrientes (CONABIO, 2022). Los nutrientes siguen un ciclo externo y un ciclo interno; este último presentándose entre la capa vegetal y el suelo en un ecosistema forestal (Bosco *et al.*, 2004).

La dinámica de los nutrientes puede alterarse con la implementación de un sistema agrícola que, al momento de establecerse en un ecosistema forestal, lo simplifica, para así poder encausar y acumular materia y energía en el producto de interés humano que pueden ser alimentos, madera, forraje, etc. (Paruelo y Batista, 2006). Todos estos procesos tienen un espacio central: el suelo, que es donde el clima, los seres vivos, el relieve, el tiempo y la roca madre interactúan (Bosco *et al.*, 2004) y al mismo tiempo es el espacio físico que le da soporte a las plantas, le suministra agua y nutrientes (FAO, 2015; Burbano-Orjuela, 2016;).

Los nutrientes siguen un camino cíclico. Sin embargo, a medida que el componente agrícola se vuelve intensivo, tiende a concentrar mayor cantidad de masa y energía (entre ellos los nutrientes) en el producto de interés económico, mismo que abandona el sistema vía cosecha (Silver *et al.*, 2021). Aunque los nutrientes regresan porque siguen un ciclo, estos ingresos al sistema se tornan lentos en comparación a los egresos creando así un desbalance en el suelo, inducido por el hombre (Tan *et al.*, 2005).

La solución más inmediata que suele aplicarse para contrarrestar el déficit de nutrientes y sostener la producción de productos de interés económico, son los “subsídios energéticos” (Paruelo y Batista, 2006) en forma de fertilizantes que, en uso excesivo, se convierten en contaminantes en el ecosistema (Ongley, 1997).

En la actualidad el manejo sostenible del suelo para mantener su integridad se ha convertido en prioridad (Cotler *et al.*, 2007). Es necesario producir alimentos, pero también conservar la integridad y funcionalidad del suelo, y eso es lo que se pretende con esquemas de producción como los sistemas agroforestales (Vignola *et al.*, 2015).

Para que los ecosistemas agroforestales cumplan con sus objetivos de producir y conservar la funcionalidad de sus componentes ecosistémicos, es necesario que valla acompañada de buenas prácticas de manejo; lo anterior es porque cuando un ecosistema forestal sufre un cambio de uso de suelo cambian los procesos de mineralización de la materia orgánica, afectando la actividad biológica y el retorno de nutrientes (Rivas *et al.*, 2009).

Po lo anteriormente expuesto, este trabajo se centra en analizar y conocer el estado actual de las propiedades fisicoquímicas de suelos que por aproximadamente 80 años han estado sosteniendo cultivos de café bajo sombra. Esto para conocer si durante todo este tiempo, se han conservado la calidad del suelo, considerando que son cafetales con manejo tradicional, sin mecanización y en su mayoría con manejo orgánico, o en algunos casos se aplican cantidades insignificantes de fertilizantes nitrogenados, subsidiados por el Estado.

La hipótesis propuesta es que existen diferencias en las propiedades fisicoquímicas en los tres tipos de suelos que se encuentran en la región de estudio. Los resultados obtenidos permitirán generar acciones para el manejo sostenible de los suelos cafetaleros, que se encuentran en manos de pequeños productores indígenas, sin acceso a asistencia técnica.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

## Área de estudio

Este trabajo se realizó en la zona cafetalera del municipio de Motozintla, ubicado en la región Sierra Madre de Chiapas (566515.64 m E, 1691655.35 m N) (Figura 9). En esta zona la precipitación media anual oscila entre 3000 y 3 500 mm (INEGI, 2006), la temperatura media anual oscila entre 20 ° C en la parte baja y de 24 ° C en la parte alta (INEGI, 2007). Se describen tres tipos de suelos: acrisol, cambisol y regosol (INEGI, 2005).

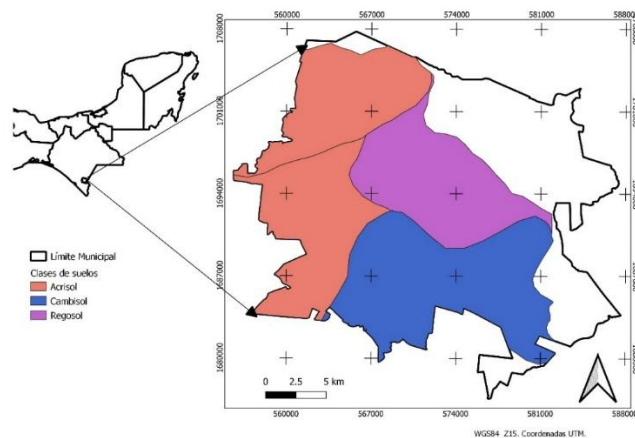


Figura 9. Tipos de suelos en la zona cafetalera de estudio en Motozintla, Chiapas.

El presente estudio compara propiedades fisicoquímicas entre los tres tipos de suelos presentes en la región cafetalera del municipio de Motozintla, Chiapas. Aunque ninguno de los tres tipos de suelos es clasificado por características que influyen en su fertilidad, tienen atributos que pueden influir en este aspecto, como los tipos de arcilla, composición química, etc. (IUSS Working Group WRB, 2015).

Por otro lado Moguel y Toledo (1999), clasificaron cinco esquemas de producción de café en México y son: a) rustico o de montaña, b) policultivo tradicional, c) policultivo comercial, d) monosombra y e) monocultivo a “puro sol”. Los cafetales estudiados en este trabajo son los dos primeros esquemas, que también son llamados cafetales con manejo tradicional. Debido a su manejo agronómico no mecanizado, conservan gran parte de la biodiversidad (Soto-Pinto *et al.*, 2001),

además no utilizan pesticidas y el uso de fertilizantes sintéticos es esporádico o nulo.

### Muestreo de suelos

Se muestrearon 27 parcelas cafetaleras, 9 en cada tipo de suelo. Los sitios se determinaron al azar considerando siempre que fueran parcelas en producción.

Para la toma de muestras, se delimitó un sitio cuadrado de 625 m<sup>2</sup> considerando lo realizado por Rosas *et al.*, (2008). Cada muestra se conformó de diez submuestras, que fueron tomadas de los primeros 15 cm de profundidad, dentro del área de goteo de 15 plantas tomadas al azar dentro del sitio.

Las submuestras se tomaron con una pala recta perfectamente limpia, y colocadas en un recipiente donde se mezcló para formar una muestra compuesta perfectamente homogenizada de aproximadamente 1.0 kg. Las muestras se etiquetaron y se secaron a sol directo hasta perder la humedad excesiva. Posteriormente se cribaron las muestras con un tamiz de 2 mm para separar piedras o materiales extraños y se colocaron en bolsas de papel para su traslado al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se analizaron las variables descritas en la Tabla 6.

Tabla 6. Métodos utilizados para las variables fisicoquímicas en muestras de suelos.

1. (DA) Densidad aparente (gr/cm <sup>3</sup> ) Método del cilindro (Woerner, 1989) * en campo.	8. (Ca) Calcio (mg/kg) Espectrofotometría de absorción atómica (SEMARNAT, 2000).
2. (pH) Potencial de hidrógeno pH en agua (SEMARNAT, 2000)	9. (Mg) Magnesio (mg/kg) Espectrofotometría de absorción atómica (SEMARNAT, 2000).
3. (CE) Conductividad eléctrica (µs/cm)	10. (Mn) Manganeso (mg/kg)

	Suspensión suelo-agua 1:5 (Woerner, 1989)	DTPA-TEA-CaCl <sub>2</sub> (SEMARNAT, 2000)
4. (MO)	Materia orgánica (%) Walkley y Black (SEMARNAT, 2000)	11. (Fe) Hierro (mg/kg) DTPA-TEA-CaCl <sub>2</sub> (SEMARNAT, 2000)
5. (N)	Nitrógeno (%) Micro-Kjeldhal (SEMARNAT, 2000)	12. (Zn) Zinc (µg/g) DTPA-TEA-CaCl <sub>2</sub> (SEMARNAT, 2000)
6. (K)	Potasio (mg/kg) Espectrofotometría de absorción atómica (SEMARNAT, 2000).	13. (Cu) Cobre (mg/kg) DTPA-TEA-CaCl <sub>2</sub> (SEMARNAT, 2000)
7. (P)	Fósforo (mg/kg) Colorimetría (SEMARNAT, 2000)	

Los resultados fueron sometidas a las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965) y homogeneidad de varianzas de Levene (Levene, 1960). A las variables que no cumplieron los supuestos se les obtuvo su logaritmo natural para ajustarlas y analizarlas con estadística paramétrica (West, 2022). Las variables se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) conforme a un diseño de bloques al azar, a un nivel de significancia de  $p=0.05$ . La prueba de comparación de medias se realizó con la prueba honestamente significativa de Tukey.

## RESULTADOS

Se presentan los resultados de las propiedades fisicoquímicas de los suelos cafetaleros bajo esquemas agroforestales en la Sierra Madre de Chiapas, considerando los tres tipos de suelos existentes en el área de estudios.

Los resultados muestran que los tres tipos de suelos presentan gran similitud entre ellos, a excepción del contenido de fósforo y cobre y hierro. En la Tabla 7 se muestran los resultados generales por sitio y tipo de suelo para todas las variables estudiadas.

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de las parcelas estudiadas.

PARCELA	TIPO DE SUELO	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS												
		DA (gr/cm <sup>3</sup> )	CE (µs/cm)	Ph	MO %	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (µg/g)
3 de mayo	Acrisol	0.86	205.50	5.57	5.81	0.29	22.40	109.60	0.74	2373.20	205.80	7.99	48.71	1.38
5 de Nov.	Acrisol	0.90	56.10	6.05	7.51	0.37	61.73	344.10	0.79	2417.40	201.60	67.22	32.97	3.76
Piedra P.	Acrisol	0.96	70.95	4.72	5.22	0.26	13.29	89.10	0.02	1286.40	125.90	5.36	38.09	0.07
Belisario	Acrisol	1.09	40.45	6.33	5.03	0.25	21.28	211.70	0.37	2904.00	334.90	2.43	29.21	0.52
El Horizonte	Acrisol	1.02	179.05	5.95	7.12	0.36	10.63	165.00	0.16	2694.40	308.70	4.77	14.75	0.56
Finca Union	Acrisol	1.07	273.00	4.73	4.47	0.21	143.97	1012.10	0.39	1862.00	175.30	6.54	27.21	1.08
B. Ixtepec	Acrisol	0.96	82.90	6.02	6.00	0.30	46.00	140.50	0.08	2219.80	458.10	3.89	20.72	0.49
Ej. José Ixt. 1	Acrisol	0.77	115.90	4.61	6.53	0.32	34.85	61.60	0.16	288.00	51.70	5.38	27.72	0.29
SantaRosa	Acrisol	1.05	125.30	5.53	7.05	0.35	60.10	288.70	0.74	2212.40	207.80	31.79	37.81	2.57
Berriozabal	Cambisol	0.85	119.70	4.74	7.19	0.36	125.07	174.30	0.10	1167.20	319.90	52.46	62.89	2.16
C. Porvenir	Cambisol	0.99	73.90	4.38	5.49	0.28	213.43	246.00	0.11	578.20	132.80	32.58	48.80	4.44
Prop.Cueva	Cambisol	0.96	49.95	6.01	5.16	0.26	117.35	254.50	0.34	2347.20	235.90	5.65	31.46	0.66
La cueva	Cambisol	0.90	87.45	5.82	5.56	0.28	106.97	120.60	0.04	3181.00	540.50	15.76	23.71	0.43
Llano Gr 1	Cambisol	0.96	111.60	4.36	6.42	0.32	270.91	137.40	0.49	1059.20	63.90	28.17	73.12	1.46
Llano Gr 2	Cambisol	0.96	251.00	4.50	4.70	0.24	333.99	378.70	0.05	1443.40	173.10	4.03	52.59	0.05
Maiz Blanco	Cambisol	1.08	81.70	5.12	5.76	0.29	198.00	418.60	0.05	1790.40	240.20	12.07	35.03	0.37
Monteflor	Cambisol	1.00	463.00	4.24	6.47	0.32	353.95	341.40	0.11	1994.00	149.50	14.38	48.86	0.92
Sonora 24 de febrero	Cambisol	0.98	153.50	5.61	5.16	0.25	198.26	302.80	0.17	2663.80	349.90	11.15	21.13	1.29
Buenos Aires	Regosol	1.00	53.50	6.10	6.27	0.31	16.00	407.80	0.88	2624.80	308.80	37.89	44.24	2.81
	Regosol	0.91	44.45	5.22	5.36	0.27	35.92	113.00	0.94	1497.40	209.80	44.36	76.23	0.51
Capulines	Regosol	1.13	61.70	6.35	5.49	0.28	19.15	119.10	0.36	3283.80	723.10	29.74	20.53	0.98
Camionero	Regosol	0.92	260.50	4.53	7.58	0.37	21.81	201.70	0.18	1072.20	126.80	10.29	35.78	0.06
El Mango	Regosol	1.05	881.50	4.49	6.53	0.33	71.00	181.50	0.11	1853.00	310.80	5.04	37.37	2.20
Esperanza	Regosol	0.99	146.30	4.70	5.09	0.25	64.66	206.70	0.46	1927.80	241.40	4.74	45.37	0.29
Ej. Jose Ixt. 2	Regosol	0.71	344.50	5.22	10.13	0.51	26.61	136.00	0.76	2937.80	335.20	47.93	76.12	0.58
Sinaltepec	Regosol	1.03	53.85	5.18	4.57	0.23	48.00	88.90	0.42	2066.80	339.80	71.40	61.37	1.95
Tolimán	Regosol	0.87	124.80	4.83	5.75	0.29	72.11	133.30	0.46	1521.00	160.00	4.30	64.66	0.38

Promedio	0.96	167.113	5.21 7	6.05 3	0.30 2	100.276	236.470	0.349	1972.837	260.415	21.012	42.091	1.194
Desviación estándar	0.10	175.71	0.68	1.20	0.06	99.27	186.22	0.29	768.31	145.79	20.62	17.81	1.15
Intervalo de confianza al 95%	0.04	66.28	0.26	0.45	0.02	37.44	70.24	0.11	289.80	54.99	7.78	6.72	0.43
Valor de p entre tipos de suelos	0.98	0.869	0.26	0.65	0.66	0.0004*	0.34	0.03*	0.72	0.52	0.24	0.04*	0.97

\*Diferencias significativas ( $p < .05$ ) \*\* Diferencias altamente significativas ( $p < .01$ )

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas por tipo de suelo. Los datos muestran la media y el intervalo de confianza al 95% (n=9).

TIPO DE SUELO	DA (gr/cm <sup>3</sup> )	CE (µs/cm)	Ph	MO %	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (µg/g)
Acrisol	0.97±0.07	127.68±50.56	5.49±0.43	6.08±1.05	0.30±0.05	46.03±26.99	269.16±181.92	2028.62±524.60	229.98±78.92	15.042±14.05	30.80±6.58	0.38±0.20	1.19±0.80
Cambisol	0.96±0.04	154.64±84.79	4.97±0.45	5.76±0.79	0.28±0.04	213.10±59.53	263.81±69.14	1802.71±544.63	245.08±93.46	19.58±10.14	44.18±11.54	0.16±0.10	1.30±0.88
Regosol	0.96±0.08	219.01±175.97	5.17±0.43	6.30±1.10	0.31±0.05	41.69±14.93	176.44±62.66	2087.17±474.71	306.19±113.83	28.41±15.65	51.29±12.62	0.50±0.19	1.08±0.64
Valor de P	0.98	0.87	0.26	0.65	0.66	0.0004**	0.35	0.72	0.52	0.24	0.04*	0.03*	0.97

\*Diferencias significativas ( $p < .05$ )

\*\*Diferencias altamente significativas ( $p < .01$ )

## Densidad aparente

La densidad aparente de toda la región estudiada registró un promedio de  $0.96 \pm 0.03 \text{ gr/cm}^3$  (media + intervalo de confianza al 95%). Los tipos de suelos no presentaron diferencias significativas en densidad aparente. De acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 los suelos corresponden a un tipo de suelo orgánico o volcánico (Tabla 11).

Tabla 9. Clasificación de resultados de densidad aparente (SEMARNAT, 2000).

<b>Tipos de suelos</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Orgánicos y volcánicos	Menores a 1
Minerales	
Arcillosos	1 a 1.19
Francosos	1.20 a 1.32
Arenosos	Mayores a 1.32

## Conductividad eléctrica

En el presente estudio no se encontraron diferencias significativas entre los tipos de suelos estudiados, y el valor promedio fue de  $167.11 \pm 66.27 \text{ } \mu\text{S/cm}$  ( $0.167 \text{ dS/m}$ ). Estos valores se clasifican como efectos despreciables de salinidad. Todas las parcelas presentaron valores menores a  $1 \text{ dS/metro}$  (Tabla 10).

Tabla 10. Interpretación de conductividad eléctrica (SEMARNAT, 2000).

<b>CE (dS m<sup>-1</sup> a 25°C)</b>	<b>Efectos</b>
<1	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 a 2	Muy ligeramente salino
2.1 a 4	Moderadamente salino
4.1 a 8	Suelo salino
8.1 a 16	Fuertemente salino
>16	Muy fuertemente salino

## pH

Los resultados obtenidos en los cafetales estudiados no presentaron diferencias estadísticas entre los tipos de suelos y registraron un promedio de  $5.22 \pm 0.25$ . Estos valores se clasifican como moderadamente ácidos (Tabla 11).

Tabla 11. Clasificación de suelos en cuanto a su valor de pH (SEMARNAT, 2000).

<b>Clasificación</b>	<b>pH</b>
Fuertemente ácido	<5
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

De las parcelas analizadas (12/27), 44% presentaron problemas graves de acidez con un pH menor a 5; a su vez 56% (15/27) presentaron valores entre 5.1 y 6.5 considerados moderadamente ácidos. No se observó ninguna parcela con acidez neutra.

## Materia orgánica

En este estudio la materia orgánica de los tres tipos de suelos cafetaleros no registró diferencias estadísticas significativas y el valor promedio fue de  $6.05 \pm 0.45$  %, clasificándose como clase baja (Tabla 12).

Tabla 12 . Clasificación de suelos conforme a su contenido de materia orgánica (SEMARNAT, 2000).

<b>Clase</b>	<b>Materia orgánica (%) Suelos volcánicos</b>
Muy bajo	<4
Bajo	4.1 a 6
Medio	6.1 a 10.9
Alto	11 a 16
Muy alto	>16

Analizando entre parcelas, se encontró que de acuerdo con la clasificación de la SEMARNAT, (2000) 59 % de las parcelas (16/27) registraron valores entre 4.1 y 6%, es decir contenidos bajos de materia orgánica; el 41% de las parcelas (11/27) registraron valores entre 6.1 y 10.9, es decir valores medios; no hubo ningún sitio con valores altos de materia orgánica.

### **Nitrógeno**

El nitrógeno no presentó diferencias estadísticas entre tipos de suelos. El promedio regional fue de 0.3% y se clasifica como suelos con valores medios (Tabla 13)

Analizando entre parcelas se encontró que 59% (16/27) registraron valores bajos de nitrógeno y 41% presentaron valores entre 0.3 y 0.8%, que está clasificado como valores medios. No se registró ninguna parcela con valores altos de nitrógeno.

Tabla 13. Interpretación de resultados de nitrógeno (SEMARNAT, 2000).

<b>Clase</b>	<b>Nitrógeno total (%)</b>
Bajo	<0.3
Medio	0.3 a 0.8
Alto	>0.8

### **Fósforo**

El fósforo, a diferencia de los otros macronutrientes si presentó diferencias estadísticas significativas entre tipos de suelos ( $p=0.0004$ ). Los cambisoles presentaron mayor concentración de fósforo con  $213 \pm 59.53$  mg/kg y los acrisoles y regosoles tuvieron menor concentración con  $46.03 \pm 26.99$  mg/kg y  $41.70 \pm 14.93$  mg/kg. De acuerdo con SEMARNAT (2000), los tres tipos de suelos se clasifican con alta concentración de fósforo (Tabla 14) (Figura 10).

Comparando entre sitios se encontró que solo 7% (2/27) se clasificaron como de baja concentración; 19% (5/27) de los sitios se clasificaron en valores medios de fósforo y 74% (20/27) como valores altos mayores a 30 mg/kg.

Tabla 14. Interpretación de resultados de fósforo (SEMARNAT, 2000).

Clase	Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )
Bajo	<15
Medio	15 a 30
Alto	>30

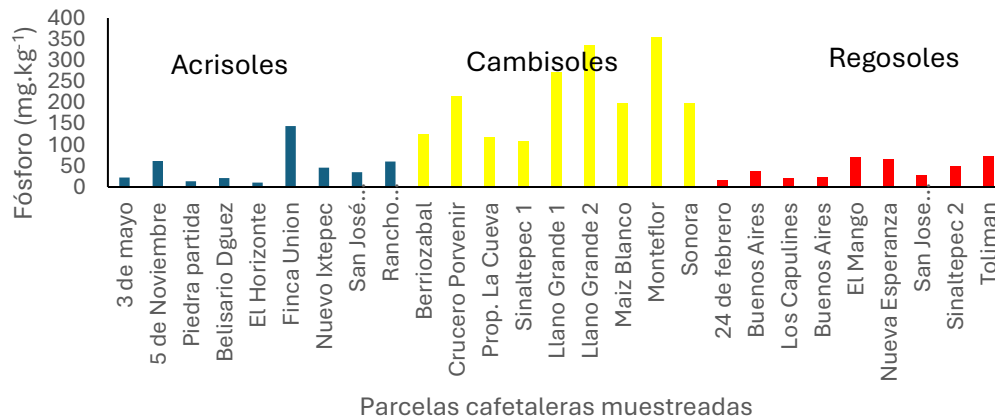


Figura 10. Fósforo en los tres tipos de suelos cafetaleros.

## Potasio

El potasio no presentó diferencias estadísticas entre tipos de suelos. El promedio regional fue de  $236.47 \pm 70$  mg/kg. Esto lo clasifica como suelos con alta concentración de potasio (Tabla 15).

Al comparar entre sitios se encontró que solo 4% de los sitios (1/27) presentaron valores muy bajos de potasio; 15% (4/27) estuvieron en la clase baja; 44% (12/27) estuvieron en la clase media y 63% (10/27) estuvieron entre la clase alta de potasio.

Tabla 15. Interpretación de resultados de potasio (SEMARNAT, 2000)

<b>Clase</b>	<b>K Cmol (+) kg<sup>-1</sup> (mg/kg)</b>
Muy baja	<0.2 (< 78.196 mg/kg)
Baja	0.2 a 0.3 (<78.196 mg/kg a 117.294 mg/kg)
media	0.3 a 0.6 (117.294 mg/kg a 234.588 mg/kg)
Alta	>0.6 (>234.588 mg/kg)

## Calcio

El calcio no presentó diferencias estadísticas entre tipos de suelos. El promedio regional es de  $1972.84 \pm 289.8$  mg/kg y los sitúa como suelos con concentración media de calcio (Tabla 16).

Al analizar las parcelas se encontró que 4% de los estas (1/27) presentó valores “muy bajos”; 4% (1/27) se clasifica como “bajo”; 44% (12/27) se clasifica como “media” y 48% (13/27) se clasifica como alto.

Tabla 16. Interpretación de los resultados de calcio (SEMARNAT, 2000).

<b>Clase</b>	<b>Ca Cmol (+) kg<sup>-1</sup> (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy baja	<2 (< 400.78 mg/kg)
Baja	2 a 5 (<400.78 mg/kg a 1001.95 mg/kg)
media	5 a 10 (1001.95 mg/kg a 2003.9 mg/kg)
Alta	>10 (>2003.9 mg/kg)

## Magnesio

El magnesio no presentó diferencias significativas entre tipos de suelos. El valor promedio del área de estudio fue de  $260.41 \pm 54.9$  mg/kg, clasificándose como un suelo con valores medios (Tabla 17).

La comparación entre sitios mostró que solamente 4% (1/27) de los sitios presentó valores muy bajos, 19% (5/27) se clasificó como bajo, 63% (17/27) se

clasificaron como valores medios y 11% (3/27) presentaron valores altos de magnesio.

Tabla 17. Interpretación de los valores de magnesio (SEMARNAT, 2000)

<b>Clase</b>	<b>Mg Cmol (+) kg<sup>-1</sup> (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy baja	<0.5 (< 60.76 mg/kg)
Baja	0.5 a 1.3 (<60.76 mg/kg a 157.9825 mg/kg)
Media	1.3 a 3 (157.9825 mg/kg a 364.575 mg/kg)
Alta	>3 (>364.575 mg/kg)

### **Manganeso**

Los valores de manganeso no presentaron diferencias estadísticas entre tipos de suelos. El promedio regional fue de 21.1±7.7 mg/kg (Tabla 18).

Debido a que el manganeso es un micronutriente, su concentración en el suelo se clasifica como deficiente o adecuado. De acuerdo con SEMARNAT (2000), todas las parcelas tienen adecuados niveles de manganeso.

Tabla 18. Interpretación de los valores de manganeso (SEMARNAT, 2000)

<b>Clase</b>	<b>Mn (mg/kg)</b>
Deficiente	<1
Adecuado	>1

### **Hierro**

El hierro presentó diferencias estadísticas entre tipos de suelos. Los acrisoles presentaron un promedio de 30.80±6.58 mg/kg, los cambisoles de 44.18±11.54 mg/kg, y los regosoles de 51.29±12.62 mg/kg. Estos valores son adecuados

conforme a la SEMARNAT, (2000), (Tabla 19). Al analizarlo entre parcelas, se encontró que ninguna parcela presenta valores menores de 4.5 mg/kg.

Tabla 19. Interpretación de los valores de hierro (SEMARNAT, 2000)

Clase	Fe (mg/kg)
Deficiente	<2.5
Marginal	2.5 a 4.5
Adecuado	>4.5

## Cobre

El cobre (Cu) presentó diferencias estadísticas significativas entre tipos de suelos ( $p=0.03$ ), siendo mayor en suelos regosoles con un promedio de  $0.51\pm 0.19$  mg/kg; los cambisoles registraron un promedio de  $0.16\pm 0.10$  mg/kg y los acrisoles  $0.38\pm 0.20$  mg/kg. De acuerdo con SEMARNAT, (2000) los regosoles tienen suficiente cobre, mientras que los cambisoles y acrisoles se clasifican como deficientes (Tabla 20) (Figura 12).

Al comparar entre sitios se encontró que 48% de las parcelas (13/27) tienen deficiencias de cobre y 52% (14/27) registran niveles adecuados.

Tabla 20. Interpretación de los valores de cobre (SEMARNAT, 2000)

Clase	Cu (mg/kg)
Deficiente	<0.2
Adecuado	>0.2

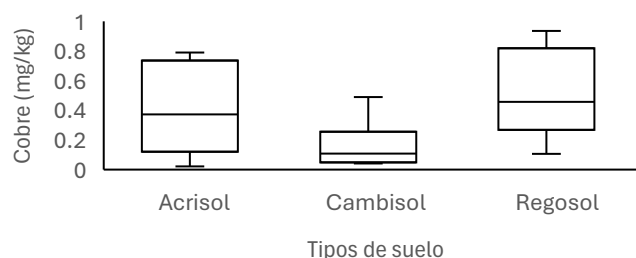


Figura 11. Distribución de los valores de cobre (mg/kg) en los tres tipos de suelos estudiados ( $p=0.03$ )

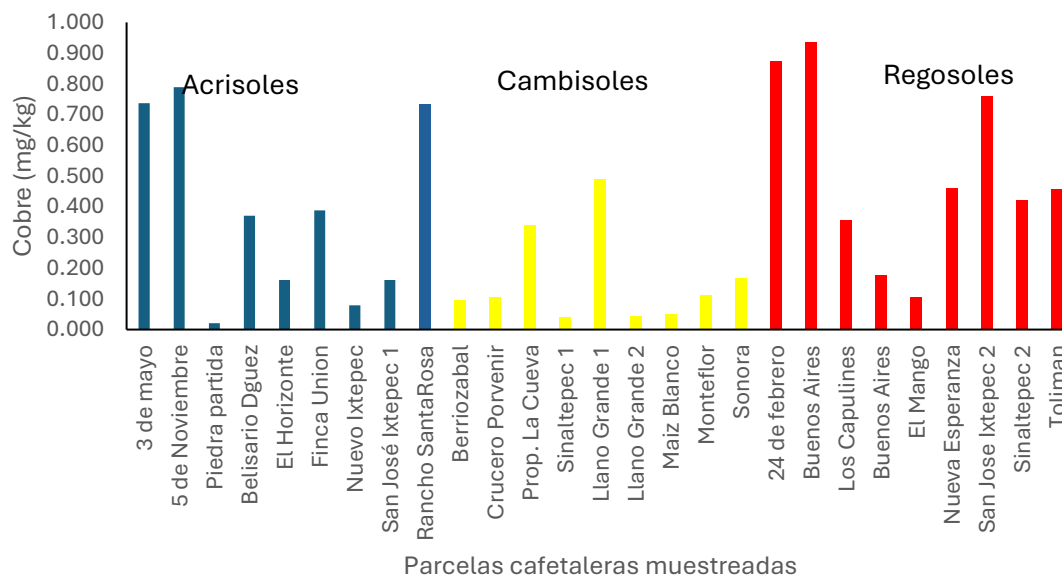


Figura 12. Valores encontrados de cobre en todas las parcelas de los tres tipos de suelos estudiados.

## Zinc

Los valores de Zinc no presentaron diferencias estadísticas significativas entre tipos de suelos. El promedio regional fue de  $1.19 \pm 0.43 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Estos valores se clasifican como suelos deficientes de Zinc (Tabla 21).

La comparación entre sitios muestra que 85% (23/27) se encuentra clasificado como deficiente y 15% (4/27) como marginal. No se encontró ningún sitio con niveles adecuados de Zinc.

Tabla 21. Interpretación de los valores de Zinc (SEMARNAT, 2000).

Clase	Mn (mg/kg)
Deficiente	<2.5
Marginal	2.5 a 4.5
Adecuado	>4.5

## DISCUSIÓN

### Densidad aparente

Es fundamental determinar la densidad aparente del suelo, porque es una de las características más sencillas de calcular y tiene relación con la compactación, la cantidad de materia orgánica, la textura del suelo y la disponibilidad de agua (Romero-Barrios *et al.*, 2015)

La densidad aparente de los suelos estudiados muestra que son de origen orgánico o volcánico (SEMARNAT, 2000) y no presentan problemas de compactación, a pesar de que muchos cafetales siguen produciendo consecutivamente desde la consolidación de la cafecultura en la región a principios del siglo XX (Venegas-Sandoval *et al.*, 2020). Las actividades de manejo se realizan sin mecanización, aunado a la presencia de arbolado y aporte de materia orgánica, se tienen suelos sin compactación ya que la MO tiene una relación positiva con la densidad aparente del suelo (Salamanca y Sadeghian, 2005; Romero-Barrios *et al.*, 2015).

Los valores de densidad aparente encontrado en los suelos estudiados, tiene valores similares a suelos forestales como los  $0.8 \text{ g/cm}^3$  (Romero-Barrios *et al.*, 2015),  $0.76$  a  $1.1 \text{ g/cm}^3$  (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010),  $0.33 \text{ g/cm}^3$  (Pérez Hernández *et al.*, 2023).

En contraste a lo anterior, otros usos de suelos presentan problemas de densidad aparente, como lo encontrado en cultivos de caña, cuyas densidades oscilaron entre  $1.19$  a  $1.46 \text{ g/cm}^3$  o lo encontrado en potreros con un promedio de  $1.24 \text{ g/cm}^3$  (Sánchez *et al.*, 2003). En el cultivo de caña la densidad aparente presenta altos valores por el uso de maquinaria agrícola y en la segunda por el pisoteo del ganado.

De manera complementaria, es importante mencionar que en suelos con alta densidad aparente las raíces tienen problemas para desarrollarse, y eso ocurre

cuando se pierde el 50% del espacio poroso y equivale a un valor de 1.57 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente (Sánchez *et al.*, 2003).

### **Conductividad eléctrica**

El suelo siempre tiene presencia de sales, aunque el exceso afecta el funcionamiento de las plantas y de microorganismos (Cremona y Soledad, 2020). La manera en que medimos la concentración de sales es a través de la conductividad eléctrica. Esta se define como la capacidad del agua del suelo de transportar una corriente eléctrica, que está dada por un proceso electrolítico determinado por cationes como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y NH<sup>4+</sup> y por aniones como SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sup>3-</sup>, HCO<sup>3-</sup> (USDA, 2011)

La conductividad eléctrica encontrada en los suelos cafetaleros tiene efectos despreciables. Mata-Fernández *et al.*, (2014), mencionan que los problemas de salinidad se presentan principalmente en suelos subhúmedos, áridos, semiáridos, regiones costeras o en suelos con grandes cantidades de fertilización. Ninguna de estas condiciones ocurre para el área de estudio.

Es importante mencionar que la salinidad tiene un punto crítico a los 4 dSm<sup>-1</sup> para la mayoría de los cultivos, sin embargo, se ha observado que para plántulas de café el nivel crítico es de 1.1 dS/m (Sadeghian y Zapata, 2014). Esta cantidad está lejos de los 0.167 dS/m encontrados en los cafetales bajo sombra.

### **pH**

El pH es de los valores más cruciales para la agricultura; indica la concentración del ion hidrógeno (H<sup>+</sup>) en la solución del suelo. Los suelos de manera natural tienen un rango que oscila entre 3.5 y 10, y está determinado por el material que le dio origen y su interacción con otros procesos formadores (Cremona y Soledad, 2020).

La importancia de conocer el pH del suelo se debe a que los nutrientes van a cambiar de disponibilidad dependiendo del rango del pH, aunque la mayoría de

los nutrientes están disponibles cuando el pH se encuentra entre 5.5 y 7.5 (FAO, 2020).

De acuerdo con Sadeghian, (2016) el cultivo de café tendrá un óptimo desarrollo entre un pH de 5 y 5.5. Acorde con la IUSS Working Group WRB, (2015) el café se adapta a suelos ácidos. Los resultados de la región muestran que el 44% de las parcelas registran pH menores a 5, lo cual implica que varios nutrientes no estén disponibles (Osorio, 2012).

La región entera presenta valores de moderadamente ácido y muy ácido. Esta condición es causada por muchos factores y pueden ser por: su origen como los acrisoles (del latín *Acris*= muy ácido) (IUSS Working Group WRB, 2015); por el uso de fertilizantes amoniacales (Cruz-Macías *et al.*, 2020); por la lixiviación de los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^{+}$ ) debido a la precipitación abundante en la región que fluctúa de 3,000 a 3,500 mm anuales (INEGI, 2006); por la descomposición de la materia orgánica que durante el proceso libera iones de hidrógeno ( $\text{H}^{+}$ ) (Bolan *et al.*, 2005); o por la vegetación que al tomar bases intercambiables del suelo contribuye a la acidificación (Sadeghian, 2016).

En general, se han reportado que los suelos cafetaleros en México se encuentran en suelos ácidos y ligeramente ácidos, con valores de pH= 5.08 (López *et al.*, 2016), 5.7 a 5.9 (Gómez González *et al.*, 2018), 4.43 a 4.92 (Canseco-Martínez *et al.*, 2020), y 4.7 a 5 (Rosas *et al.*, 2008).

### **Materia orgánica**

La materia orgánica (humus) es el componente del suelo más complejo, dinámico y activo (Romero-Barrios *et al.*, 2015). Aunque no hay una definición exacta, generalmente se describe como “sustancias variadas de color pardo y negruzco, que resultan de la descomposición de residuos vegetales” (Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

Los cafetales bajo sombra han sido reconocidos por sus múltiples beneficios ambientales, uno de ellos es la conservación de los niveles de materia orgánica del suelo (Villarreyna *et al.*, 2020). La caída de hojarasca y ramas aporta la materia orgánica presente en los suelos cafetaleros (Cardona-Calle y Sadeghian, 2005; Sadeghian, 2011).

Para los cafetales estudiados se obtuvo el promedio de 6.05% de materia orgánica (MO). Otros valores de materia orgánica en cafetales bajo sombra son: 5.13% en Oaxaca (Canseco-Martínez *et al.*, 2020), 4% en Acacoyagua y Mapastepec, Chiapas (Rosas *et al.*, 2008), con 9.2 a 11.6% en la Concordia, Chiapas (Gómez-González *et al.*, 2018).

En contraste a lo anterior, los valores de MO en suelos con otros usos agrícolas reportan valores menores como los reportados en cultivos de maíz con 1.7, 3.45 y 2.58 % en la Concordia, Chiapas (López *et al.*, 2019; Martínez-Aguilar *et al.*, 2020); de 2.5% de MO en caña de azúcar en Tamaulipas (Reséndiz *et al.*, 2015); 2.83% en cultivo de mango convencional en Michoacán (Ordaz-Gallegos *et al.*, 2020), etc.

A pesar de que los porcentajes de materia orgánica son mayores en cafetales que en otros sistemas agrícolas, Sadeghian (2019) menciona que el porcentaje de MO óptimo para el cultivo de café debe ser entre 8 y 16%. Acorde con esto, el 96% (26/27) de las parcelas estudiadas son considerados con niveles deficientes. SEMARNAT, (2000), también clasifica estos suelos cafetaleros como bajos en materia orgánica.

En los cafetales bajo sombra existe una caída permanente de hojarasca pero los niveles de MO en los suelos no son los suficientemente altos para sostener una producción óptima de café, entonces pueden existir algunos de los siguientes problemas: a) baja tasa de mineralización debido a la acidez del suelo, principalmente en aquellas parcelas con pH menores a 5 (Bot y Benítez, 2005), b) la cantidad y calidad nutricional de la hojarasca (Ávila y Zamora, 2010), c) problemas de erosión por falta de obras de conservación de suelos como barreras vivas y terrazas para detener la hojarasca (Andrade y Rodríguez, 2002).

## Nitrógeno

El nitrógeno es el principal macronutriente. Su importancia para los cultivos consiste en que está relacionado en los procesos fotosintéticos y por ende en la acumulación de biomasa (Corrales-González *et al.*, 2016), que es muy importante en la agricultura.

El nitrógeno presente en el suelo está ligado en gran medida a la materia orgánica (Sadeghian, 2019), por lo tanto, suelos menores a 6 % de MO como los obtenidos en el presente estudio, mostraron bajos niveles de nitrógeno para el cultivo de café.

Los valores recomendados de nitrógeno en el suelo para el cultivo de café deben estar entre 0.34 y 0.58 mg.kg<sup>-1</sup> (Sadeghian, 2019). Acorde a lo anterior este estudio reveló que el 78% de las parcelas se clasifican como valores bajos de nitrógeno es decir menores a 0.3%, y 22% se clasificó con valores óptimos (0.3-0.57%), ningún sitio presenta valores altos de nitrógeno.

Para poner en perspectiva Cristóbal-Acevedo *et al.*, (2019), evaluaron y contrastaron el contenido de nitrógeno en: un a) bosque mesófilo de montaña, b) un cafetal bajo sombra o tradicional, c) un cafetal con sombra comercial y d) cafetal a puro sol; encontraron que en el bosque mesófilo de montaña conservado encontraron 1.4% de N, en el cafetal bajo sombra tradicional el nitrógeno fue de 0.73%, en el cafetal con sombra comercial fue de 0.31% y en el cafetal a puro sol de 0.3%. Concluyeron que los ecosistemas con mayor cobertura vegetal tienen mayor contenido de nitrógeno en el suelo.

En Veracruz, se reportan valores de nitrógeno en suelos de 4 fincas con diferentes tipos de manejo; los valores fueron: 0.51% (agroecológico con manejo), 0.48% (convencional), 0.32% (organomineral) y 0.28% (agroecológico con mínimo manejo) (Márquez de la Cruz *et al.*, 2022)

Estudios como el realizado por Rosas *et al.*, (2008), muestran que en cafetales de la región los niveles de nitrógeno permanecen por debajo del mínimo

recomendado para el cultivo de café (0.33%) en la escala propuesta por Sadeghian (2019).

El nitrógeno es el nutriente más limitante en los ecosistemas terrestres (Vitousek *et al.*, 1997). La baja disponibilidad de nitrógeno en los suelos cafetaleros estudiados influye en la producción y sostenibilidad de este esquema producción. Se ha documentado que por cada 1250 kg de fruta de café cortado (en almendra), se remueven 31 kg de N por hectárea de los suelos cafetaleros (Sadeghian *et al.*, 2006).

Es importante mencionar que en los sistemas de producción intensivo el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados también puede influir en la pérdida de otros nutrientes como calcio y potasio, y por ende la fertilidad a largo plazo de los suelos (Vitousek *et al.*, 1997).

A manera de contexto, la cafecultura en la región se consolidó en un periodo de centralización de la agricultura en manos del estado, bajo el Instituto Mexicano del café (INMECAFÉ), que duró hasta finales de la década de 1980 (Bartra *et al.*, 2011). En este periodo la asistencia técnica e insumos fue subsidiada; pero a partir de 1990 con la drástica disminución de subsidios y asistencia técnica, la producción ha disminuido a nivel nacional, entre otras causas, por falta de manejo adecuado del suelo y la nutrición (Rodríguez-Toledo *et al.*, 2019). México pasó de exportar 6 millones de sacos de café verde y ser el sexto productor mundial en el año 2000 (CEFP, 2001), a exportar 3.89 millones de sacos en 2025 (USDA, 2024) y estar ahora como el onceavo productor mundial (SADER, 2018).

## **Fósforo**

El fósforo es un macronutriente sumamente importante para las plantas. A diferencia del nitrógeno, el fósforo proviene casi totalmente del material parental de las apatitas y depósitos de fosfatos (Cerón y Aristizábal, 2012). Tiene la particularidad de que es poco móvil y de bajo retorno atmosférico (Walker y Syers, 1976).

El fósforo proviene del intemperismo del material primario en forma de iones  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  que, al ser utilizado por los seres vivos, entra al ciclo biológico. Por tanto, en el suelo puede encontrarse en dos fracciones: la orgánica y la inorgánica (Tapia-Torres y García-Oliva, 2012).

A pesar de que puede existir grandes concentraciones de fósforo en el suelo, no siempre habrá grandes cantidades disponibles (Cerón y Aristizábal, 2012). Tapia-Torres y García-Oliva (2012) describen que los fosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), que son la forma inorgánica (Pi) en que las plantas lo asimilan (fosforo mineralizado), se pueden clasificar de acuerdo con su disponibilidad en:

- a) fracción orgánica de la biota (Po): los fosfatos son utilizados por los microorganismos del suelo, por lo tanto, no están disponibles para las plantas (retenidos).
- b) fósforo adsorbido (P ad): Los fosfatos son atraídos por partículas organominerales con uniones débiles por lo tanto es la fracción lábil o disponibles para las plantas.
- c) Fracción ocluida (P oc): los fosfatos se unen con iones de aluminio, hierro o calcio (Al, Fe, Ca) y se precipitan. Son las formas más inaccesibles de fósforo para las plantas.

El fósforo en el suelo generalmente se encuentra entre 100 y 3000 mg/kg y entre un 15 y 80% se encuentran en forma orgánica (Po) (Cerón y Aristizábal, 2012). Para este trabajo el fósforo extraíble encontrado en suelos cambisoles fue de  $213 \pm 59.5$  mg/kg, pero para cambisoles y regosoles se encontraron valores menores con  $46.03 \pm 26.99$  y  $41.7 \pm 14.9$  mg/kg respectivamente.

Para cafetales de Veracruz se reporta una cantidad de fosforo extraíble entre 15.91 y 33.8 mg/kg (Márquez de la Cruz *et al.*, 2022). Rosas *et al.*, (2008) reporta para cafetales en otra región de la Sierra Madre de Chiapas valores de 29.6 mg/kg, mientras que para Oaxaca reporta valores de 4.4 mg/kg. En Colombia Díaz y Sadeghian, (2018), reportan valores de fósforo de 122 y 146 mg/kg.

De acuerdo con Sadeghian, (2019) los valores mínimos de fósforo en el suelo para el cultivo de café deben ser de 10 a 20 mg/kg. En México el Instituto Mexicano del Café consideró que debe de ser 20 mg/kg (Rosas *et al.*, 2008). Acorde a lo propuesto por Sadeghian, (2019), ninguna parcela se encuentra con deficiencia de fósforo, 15% se encuentra en el rango óptimo y 85% tiene alta cantidad.

En el presente trabajo la parcela con el valor menor de fósforo fue de 16 mg/kg y el máximo fue de 333.9 mg/kg. López *et al.*, (2016) en otra región de la Sierra Madre de Chiapas, encontraron una parcela con 0 mg/kg y el máximo de 146 mg/kg con un promedio de 25 mg/kg.

Los tipos de suelos estudiados tienen en común que se considera suelos jóvenes (IUSS Working Group WRB, 2015; Sotelo-Ruiz *et al.*, 2020). De acuerdo con Walker y Syers, (1976) y Tapia-Torres y García-Oliva, (2012) los suelos jóvenes tienen una mayor disponibilidad de fósforo, ya que este nutriente es suministrado constantemente por los minerales primarios, a diferencia de los suelos desarrollados donde el fósforo está menos disponible ya que se encuentra en la fracción biológica del suelo (retenido), y ocluido formando compuestos con átomos de hierro, aluminio o calcio.

## **Potasio**

El potasio que absorben las plantas proviene principalmente del intemperismo de la roca madre, y en menor medida de compuestos orgánicos (Borges-Gómez *et al.*, 2005). Por lo tanto, tendrá mayor relación con las arcillas que con la materia orgánica (Rodríguez-Balboa *et al.*, 2023).

El potasio en el suelo puede estar en diferentes niveles de disponibilidad para las plantas de acuerdo con Barber (1995) y Henao-Toro y Hernández-Guzmán, (2002):

- a) En la solución del suelo para disponibilidad inmediata (1-10 ppm);

- b) Intercambiable o unido electrostáticamente a coloides de arcillas o materia orgánica, regulando la cantidad de potasio en la solución del suelo (40-600 ppm);
- c) No intercambiable, porque está retenido por arcillas micáceas. Aquí participa de forma lenta en el equilibrio de potasio soluble e intercambiable (50-750 ppm);
- d) Formando parte de los minerales del suelo. Aun no mineralizado (5,000-25,000 ppm).

Para el presente estudio no se detectaron diferencias significativas de potasio intercambiable. El promedio regional en los suelos cafetaleros fue de  $236.47 \pm 70$  mg/kg (ppm), el cual está dentro del rango natural (Hena-Toro y Hernández-Guzmán, 2002).

El contenido de potasio para los requerimientos del café acorde con Sadeghian, (2019), deben estar entre 78-156 mg/kg. El promedio de potasio regional se clasifica como alto contenido. Analizando entre parcelas, solamente una (4%) está en nivel crítico, 10 (37%) se encuentran en el rango óptimo y 16 parcelas (59%) tienen alta concentración de potasio.

Otros valores reportados para cafetales son: 106 mg/kg en la Sierra Madre de Chiapas, 74 mg/kg en cafetales de Guerrero, 215 mg/kg en cafetales de Veracruz (Rosas *et al.*, 2008). Para cafetales de la reserva de la biosfera el Triunfo, Chiapas, se reporta uno de los promedios más altos de 274 mg/kg (López *et al.*, 2016).

## **Calcio**

El calcio es el tercer nutriente más abundante después del nitrógeno y potasio (Jing *et al.*, 2024) y rara vez es factor limitante como nutriente (Rincón *et al.*, 2003). Al no encontrarse diferencias estadísticas significativas para el calcio en los diferentes tipos de suelos cafetaleros, sugiere que el promedio regional como representativo del área de estudio, es de  $1973 \pm 290$  mg/kg. Estos valores se

clasificaron como valores medios acorde a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Para el cultivo del café Sadeghian (2019), recomienda que el nivel óptimo debe estar entre 300 y 600 mg/kg. Acorde a estos datos solo un sitio presenta deficiencias con 288 mg/kg, un sitio se encontró en el rango óptimo con 578 mg/kg y el resto presentó altos valores.

Otros valores reportados para cafetales tradicionales en México son: Oaxaca 1559 mg/kg, Guerrero 519 mg/kg (Rosas *et al.*, 2008), 2565 mg.kg<sup>-1</sup> en cafetales alrededor de la reserva de la biosfera el Triunfo, Chiapas (López *et al.*, 2016), 788 mg/kg en cafetales de la Concordia, Chiapas (Gómez González *et al.*, 2018).

## **Magnesio**

El magnesio es un macronutriente importante para el funcionamiento de la cafecultura. Como elemento, forma parte de la clorofila y participa en varios procesos metabólicos (Ferreira *et al.*, 2023). Generalmente es deficiente donde hay deficiencia de calcio (Espinoza y Molina, 1999), o puede estar bloqueado en suelos ácidos con altas concentraciones de potasio (Ferreira *et al.*, 2023). Este nutriente se origina por la mineralización de rocas que contienen minerales primarios como dolomitas y silicatos, o forma parte de estructuras secundarias de arcillas tipo clorita, illita, montmorillonita y vermiculita (Wiend, 2007).

Debido a que en este trabajo no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los suelos, el promedio general que representa a la región estudiada fue de 260.41 ±55 mg/kg. De acuerdo con lo recomendado por Sadeghian, (2019), para el cultivo de café, la concentración óptima debe estar entre 73 y 109 mg/kg. Analizando las parcelas solamente 8% presentan deficiencias de magnesio y 92% están por encima del valor óptimo.

Otros resultados de magnesio para cafetales de la región son: 264 mg/kg para cafetales de la Concordia, Chiapas (Gómez González *et al.*, 2018), 324 mg/kg

para el Triunfo, Chiapas (López *et al.*, 2016), 235 mg/kg para cafetales en Mapastepec y Acacoyagua, Chiapas (Rosas *et al.*, 2008). Estos valores muestran que los resultados encontrados son similares a los estudios realizados en diferentes partes de la región Sierra Madre de Chiapas.

Otros valores reportados han sido en Guerrero con 57 mg/kg revelando deficiencia de dicho nutriente. En cafetales de alto rendimiento (a puro sol) se reportan valores de 207 mg/kg en Costa Rica (Castro-Tanzi, 2017). En cafetales colombianos se reportan contenidos de magnesio desde 12 a 182 mg/kg (Henao-Toro y Hernández-Guzmán, 2002), que indican menores cantidades que los reportados en la región de estudio.

## **Manganeso**

El manganeso como micronutriente participa en la estructura fotosintética de las plantas, sin embargo, también tóxico en altas concentraciones (Millaleo *et al.*, 2010).

El promedio general obtenido en el presente trabajo es de 21.01 mg/kg. En los cafetales describe que el contenido de manganeso óptimo debe ser entre 5 y 10 mg/kg (Sadeghian, 2019). El contenido muestra una ligera cantidad mayor a lo necesario en el suelo, sin llegar a ser tóxico.

Analizando entre parcelas, el 22% presentó valores por debajo de 5 mg/kg, 22% se encuentra entre el rango óptimo y 56% registró valores por encima de 10 mg/kg.

Otros cafetales reportan valores de 2.44, 2.66 y 14.36 mg/kg en la Concordia, Chiapas (Gómez-González *et al.*, 2018), 43.7 mg/kg en el Triunfo, Chiapas (López *et al.*, 2016), 50.01 mg/kg en Oaxaca y 4.65 mg/kg en Guerrero (Rosas *et al.*, 2008).

El contenido de manganeso en diversos tipos de suelos en Estados Unidos está entre 20 y 3000 mg/kg y aunque el nivel de toxicidad va a variar entre especies,

generalmente ocurre cuando en el suelo hay más de 500 mg/kg (Kabata-Pendias y Pendias, 1992), por lo tanto, los niveles encontrados en este estudio están lejos de ser tóxicos para los cafetos.

## **Hierro**

En las plantas este elemento es importante en el proceso fotosintético, en la división celular y en la fijación del nitrógeno (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). El hierro en el suelo es muy abundante y se estima entre 5,000 y 50,000 mg/kg (0.5 y 5%) (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

A pesar de la considerable cantidad de hierro en el suelo, la fracción intercambiable oscila entre 1 y 1,000 mg/kg y el soluble entre 0.1 y 25 mg/kg (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004).

El hierro en los suelos cafetaleros estudiados presentó diferencias estadísticas significativas, sin embargo, los tres valores se encuentran en cantidades óptimas, que de acuerdo con Sadeghian, (2019), debe estar entre 25 y 50 mg/kg

Analizando entre parcelas solo 18% se encuentran por debajo de 25 mg/kg 56% se encuentra en el rango óptimo y 26% se encuentra por encima de 50 mg/kg .

Otros valores de hierro reportado en cafetales son: 6.75, 11.49 y 12.45 mg/kg para La Concordia, Chiapas que son valores insuficientes para la cafecultura (Gómez González *et al.*, 2018); 74.26 mg/kg en cafetales del Triunfo, Chiapas (López *et al.*, 2016); 40.85 mg/kg en cafetales tradicionales de Guerrero y 28.96 mg/kg en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas (Rosas *et al.*, 2008).

## **Zinc**

El zinc es un micronutriente clave en la bioquímica de las plantas; forma parte de muchas enzimas relacionadas con el metabolismo de carbohidratos, proteínas,

fosfatos y auxinas, así como también en el funcionamiento del RNA (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

En un suelo no perturbado los valores de Zinc fluctúan entre 10 y 300 mg/kg (Malle, 1992). Noulas *et al.*, (2018), reportan que a nivel global se ha registrado que los valores más bajos de zinc se encuentran en suelos arenosos, calcáreos y orgánicos.

En el presente estudio el promedio regional obtenido de Zinc es de 1.19 µg/kg. De acuerdo con Sadeghian, (2019) los valores en cafetales deben estar entre 1.5 y 3 µg/kg. Esto revela que se detectan deficiencias en la cafeticultura regional.

Comparando entre parcelas, el 74% tienen deficiencias de Zinc; 19% se encuentra en el rango óptimo y solo 7% presentan niveles altos niveles para el cultivo de café.

El Zinc en altos valores puede ser fitotóxico. Se ha encontrado que ocurre mayormente cuando se encuentra entre 100 y 500 mg/kg (Noulas *et al.*, 2018). En Estados Unidos de Norteamérica, el valor máximo permitido en suelos de cultivos es de 220 mg/kg (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Los valores encontrados están lejos de los niveles tóxicos.

## **Cobre**

El cobre es esencial en las funciones bioquímicas de las plantas. Está relacionado con procesos fotosintéticos, de respiración, fijación de nitrógeno, reproducción de semillas y frutos, y resistencia a enfermedades fúngicas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

De acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias, (1992) el promedio global de cobre en el suelo, sin considerar suelos contaminados varía entre 13 y 24 mg/kg y el contenido óptimo de cobre en suelos cafetaleros debe estar entre 1 a 3 mg/kg Sadeghian, (2019). En el presente estudio, se encontró un promedio de 0.35 ±0.10 mg/kg, que es un valor muy por debajo del promedio global y del mínimo

necesario para el cultivo de café. Analizando las parcelas, el 100% de las parcelas analizadas se encuentran por debajo del mínimo recomendado.

Otros valores encontrados en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas son: 1.28, 0.28, y 0.76 mg/kg para cafetales en La Concordia, Chiapas (Gómez González *et al.*, 2018); 1.075 mg/kg en cafetales alrededor de la Reserva de la biosfera el Triunfo, Chiapas (López *et al.*, 2016), 0.8 mg/kg en cafetales de Acacoyagua y Mapastepec, Chiapas (Rosas *et al.*, 2008).

En cafetales tradicionales en otros estados se reportan 0.30 para Guerrero, 0.92 para Oaxaca, 1.36 para Puebla y 0.74 mg/kg para cafetales en Veracruz (Rosas *et al.*, 2008).

En terrenos destinados a la vitivinicultura en Cataluña, España, se obtuvieron 65 muestras de suelo en y los valores de cobre oscilaron entre 22.7 y 99.3 mg/kg (Girald *et al.*, 2020). Debido a que el cobre a altas concentraciones es tóxico para plantas y animales, en Estados Unidos el umbral en suelos de cultivos es de 100 mg/kg (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

En la Tabla 22 se muestra un resumen de los valores recomendados para la cafeticultura y los valores observados en la presente investigación.

Tabla 22. Concentraciones de valores obtenidos en cafetales de Motozintla, Chiapas y recomendaciones para el cultivo.

Variable	Concentraciones encontradas en este estudio		Valores recomendados para cultivo de café	Autores
	Promedios	Intervalo de confianza al 95% ( $\pm$ )		
DA (gr/cm <sup>3</sup> )	0.96	0.04	Menor a 1.55	(Daddow y Warrington, 1983), (Salamanca y Sadeghian, 2004)
CE ( $\mu$ s/cm)	167.11	66.28	Menor a 1100 $\mu$ s/cm	(Sadeghian y Zapata, 2014)
PH	5.22	0.26	5.0 a 5.5	(Sadeghian, 2016)
MO %	6.05	0.45	10%* 8-16%**	* (INMECAFÉ-NESTLÉ, 1990), (Rosas <i>et al.</i> , 2008) ** (Sadeghian, 2019)
N (%)	0.30	0.02	0.8%* 0.34-0.58**	** (INMECAFÉ-NESTLÉ, 1990), (Rosas <i>et al.</i> , 2008) ** (Sadeghian, 2019)
P (mg/kg)	100.28	37.44	20* 10-20**	(INMECAFÉ-NESTLÉ, 1990), (Rosas <i>et al.</i> , 2008) ** (Sadeghian, 2019)
K (mg/kg)	236.47	70.24	78-156	(Sadeghian, 2019)
Ca (mg/kg)	1972.84	289.80	300-600	(Sadeghian, 2019)
Mg (mg/kg)	260.41	54.99	73-109	(Sadeghian, 2019)
Mn (mg/kg)	21.01	7.78	5-10	(Sadeghian, 2019)
Fe (mg/kg)	42.09	6.72	25-50	(Sadeghian, 2019)
Zn ( $\mu$ g/g)	1.19	0.43	1.5-3	(Sadeghian, 2019)
Cu (mg/kg)	0.35	0.11	1-3	(Sadeghian, 2019)

## CONCLUSIONES

Al analizar el componente arbolado del sistema agroforestal de café bajo sombra en un gradiente de altitud, existieron diferencias significativas en su estructura, específicamente en las variables de riqueza de especies, diversidad alfa, y área basal. Por lo tanto, se acepta la Ha para estas variables. No existieron diferencias significativas en densidad de árboles por hectárea para lo cual se rechaza la Ha para esta variable en específico.

En relación con las propiedades fisicoquímicas de los suelos en esquemas agroforestales de café bajo sombra, solamente el contenido de fósforo, hierro y cobre presentan diferencias estadísticas significativas entre los tres tipos de suelos presentes en la región; por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación (Ha) para estas variables y se rechaza para las otras.

Se concluye que la sombra de los cafetales contiene altos valores de riqueza y diversidad, que resguardan de los tipos de vegetación con los que se traslapan. Los sistemas agroforestales estudiados no presentan problemas de compactación del suelo, ni de salinidad; la acidez de los suelos en promedio se encuentra dentro del rango natural de los suelos tropicales.

Los sistemas agroforestales estudiados se clasificaron con bajos niveles de materia orgánica y nitrógeno. Para mejorar estos niveles se necesitan obras de conservación de suelos para evitar pérdidas por erosión, y de ser necesario adiciona con enmiendas agrícolas o compostas. Los niveles de fósforo, potasio, calcio, magnesio y hierro no presentan problemas de deficiencias.

Tanto los niveles de cobre y zinc se encuentran en deficiencia en toda la región. Debido a que son microelementos importantes para la productividad y la sostenibilidad de este esquema de producción, y en grandes cantidades pueden resultar tóxicos, es necesario compensarlos con moderación de manera gradual.

De manera general el dosel arbóreo cumple con una función importante en el mantenimiento de la integridad del suelo, además de su gran importancia en la conservación de la biodiversidad; el suelo bajo esquemas agroforestales mantiene en gran medida su fertilidad a pesar de sostener por alrededor de 80 años el cultivo de café.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Sandoval, O., Ortíz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., y Cruz-Chavez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–497. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf>
- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, M., y Prieto-García, F. (2010). Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencia*, 26(2), 137–150. : [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792010000200002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000200002)
- Aguirre-Calderón, O. A., Silva-García, J. E., Alanís-Rodríguez, E., Jurado-Ybarra, E., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B., y Corral Rivas, J. J. (2022). Influencia de la altitud y exposición en la estructura y composición de un bosque templado en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1163>
- Alanís, R. E., Mora, O. A., y Marroquin, F. J. (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación* (First). Universidad Autónoma de Nuevo León. 215 p.
- Andrade, B., y Rodríguez, P. (2002). Evaluación de la eficiencia de barreras vivas como sistemas de conservación de suelos en ladera. *Bioagro*, 14(3), 123–133.
- Anta, F. S. (2006). El café de sombra: un ejemplo de pago de servicios ambientales para proteger la biodiversidad. *Gaceta Ecológica*, 80, 19–31. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908002.pdf>
- Ávila, B. C., y Zamora, M. P. (2010). Producción de hojarasca y materia orgánica en agroecosistemas cafetaleros marginales de Ocotil Chico, Veracruz, México. *Polibotánica*, 30(1), 69–87.

- Ávila-Sánchez, P., Sánchez-González, A., Catalán-Heverástico, C., Almazán-Núñez y J. Jiménez-Hernández, R. C., y Jiménez-Hernández, J. (2018). Patrones de riqueza y diversidad de especies vegetales en un gradiente altitudinal en Guerrero, México plant diversity and richness patterns on altitudinal gradient in Guerrero, México. *Polibotánica*, 0(45). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.8>
- Barber, S. A. (1995). *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach* (2da ed.). Wiley Interscience. 432 p.
- Barrios Calderón, R. de J., Pérez Pérez, J. E., Torres Velázquez, J. R., y Aguirre Cadena, J. F. (2022). Estructura y composición florística de un bosque de Pinus-Quercus en El Porvenir, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(73), 50–74. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1252>
- Bartra, V. A., Cobo, R., y Paz, P. L. (2011). *La hora del café dos siglos muchas voces* (1ra ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 238 p
- Bauters, M., Verbeeck, H., Demol, M., Bruneel, S., Taveirne, C., Van der Heyden, D., Cizungu, L., y Boeckx, P. (2017). Parallel functional and stoichiometric trait shifts in South American and African forest communities with elevation. *Biogeosciences*, 14(23), 5313–5321. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5313-2017>
- Bolan, N. S., Curtin, D., y Adriano, D. C. (2005). Acidity In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 11–17). <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00173-9>
- Borges-Gómez, L., Escamilla-Bencomo, A., Soria-Fregoso, M., y Casanova-Villarreal, V. (2005). Potasio en suelos de Yucatán. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 437–445.
- Bosco, I., Blanco, J., y Castillo, F. (2004). Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. In F. Valladares (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente. p.

479–506.

[https://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/cap17gestion\\_forestal\\_y\\_ciclos\\_de\\_nutrientes\\_en\\_el\\_marco\\_del\\_cambio\\_global.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/cap17gestion_forestal_y_ciclos_de_nutrientes_en_el_marco_del_cambio_global.pdf)

Bot, A., y Benítez, J. (2005). *The importance of soil organic matter* (1era ed., Vol. 1). FAO. <https://www.fao.org/4/a0100e/a0100e06.htm>

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Canseco Martínez, D. A., Villegas Aparicio, Y., Castañeda Hidalgo, E., Carrillo Rodríguez, J. C., Robles, C., y Santiago Martínez, G. M. (2020). Respuesta de *Coffea arabica* L. a la aplicación de abonos orgánicos y biofertilizantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1285–1298. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2612>

Cardona-Calle, D. A., y Sadeghian, K. H. (2005). Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de *Inga spp.*. *CENICAFE*, 56(2), 127–141. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2802%29127-141.pdf>

Carrera Maridueña, D. M., Carrera Maridueña, B. J., Pilaloe David, W. O., y Fernández Torres, M. S. (2022). Beneficios del establecimiento de *Inga spp* en sistemas agroforestales de la zona agrícola del cantón El Triunfo. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 6(43), 1–11. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol6iss43.2022pp1-11>

Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., y Velázquez-Martínez, A. (2010). Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 39–52.

- Castro-Tanzi, S. (2017). El calcio es un nutriente limitante en cafetales bajo manejo intensivo de fertilizantes en ultisoles. *Agronomía Costarricense*, 41(1). <https://doi.org/10.15517/rac.v41i1.29756>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (2001). *El mercado del café en México*. <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0542001.pdf>
- Cerón, R. L., y Aristizábal, G. F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285–295. <https://www.redalyc.org/pdf/776/77624081026.pdf>
- Chao, A., y Shen, T.-J. (2003). Nonparametric estimation of Shannon's Index of diversity when there are unseen species in samples. *Environmental and Ecological Statistics*, 10(4), 429–443. <https://doi.org/10.1023/A:1026096204727>
- Chao, A., y Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533–2547. <https://doi.org/10.1890/11-1952.1>
- Chao, A., Ma, K. H., y Hsieh, T. C. 2024. *Interpolation/Extrapolation (iNEXT)*. A Brief Introduction to INEXT Online: Software for Interpolation and Extrapolation of Species Diversity.
- Chao, A., Ma, K. H., Hsieh, T. C., y Chiu, C. H. 2016. *Online Program SpadeR (Species-richness Prediction And Diversity Estimation in R)*. (Species-Richness Prediction And Diversity Estimation in R).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2014, May 13). *Bosques mesófilos de montaña de México*. Uno de Los Ecosistemas Más Diversos y Amenazados. <https://www.gob.mx/conabio/prensa/bosques-mesofilos-de-montana-de-mexico?idiom=es>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2015, August 13). *Bosques, selvas y cafés de Chiapas*. El Café Bajo Sombra

Conserva La Biodiversidad. <https://www.gob.mx/conabio/prensa/bosques-selvas-y-cafes-de-chiapas>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2022, May 25). *Procesos ecológicos*. Procesos Ecológicos. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024, November 20). *Inga vera*. Árboles. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/43-legum24m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/43-legum24m.pdf)

Corrales-González, M., Rada, F., y Jaimez, R. (2016). Efecto del nitrógeno en los parámetros fotosintéticos y de producción del cultivo de la gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus ex Hook. f.). *Acta Agronómica*, 65(3), 255–260. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.49555>

Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83(1La conservación de suelos: un asunto de interés público), 5–71. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908302.pdf>

Cremona, M. V., y Soledad, E. A. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia*, 73(1), 5–8. <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>

Cristóbal-Acevedo, D., Tinoco-Rueda, J. A., Prado-Hernández, J. V., y Hernández-Acosta, E. (2019). Carbono y nitrógeno del suelo en los sistemas bosque mesófilo de montaña, agroforestal y monocultivo de café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(2), 169–184. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.070>

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., y Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos

- regiones de Chiapas, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(3), 475–480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Curtis, J. M., y McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476–496.
- Daddow, R. L., y Warrington, G. (1983). *Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture* (1st ed., Vol. 1). USDA Forest Service.
- Díaz, P. V. C., y Sadeghian, K. S. (2018). Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. *CENICAFE*, 62(2), 7–16. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc069%2802%29007-016.pdf>
- Espinoza, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de suelos* (1st ed., Vol. 1). International Plant Nutrition Institute.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2015, May 25). *Los suelos constituyen la base de la vegetación*. FAO. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/287559/>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Soil testing methods manual*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca2796en>
- Farfán, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-CENICAFÉ. Manizales, Caldas, Colombia. 342p.
- Ferreira, L. de S., Oliveira, V. de S., Marchiori, J. J. de P., Ferreira, T. C., Bernabé, A. C. B., Boone, G. T. F., Pereira, L. L. dos S., y Carriço, E. (2023). The Nutrient Magnesium in Soil and Plant: A Review. *International Journal of Plant and Soil Science*, 35(8), 136–144. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i82890>
- Flores-Ruiz E., Miranda-Navales, M.G., Villasís -Keever, M.A. (2017). El protocolo de investigación VI: Cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista alergia México* 64(3). 364-370. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>

- Flores-Vichi, F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, 4(7), 174–194. <https://doi.org/10.31644/IMASD.7.2015.a07>
- FORBES. (2023, April 19). *La Unión Europea prohíbe importar materias primas si causan deforestación*. <https://forbes.com.mx/la-ue-prohibe-importar-materias-primas-si-causan-deforestacion/>
- Gairola, S., Rawal, R. S., y Todaria, N. P. (2008). Forest vegetation patterns along an altitudinal gradient in sub-alpine zone of west Himalaya, India. *African Journal Plant Science*, 2(6), 42–48. <https://academicjournals.org/journal/AJPS/article-abstract/7124A752784>
- Gallardo-Cruz, J. A., Meave, J. A., y Pérez-García, E. A. (2005). Estructura, composición y diversidad de la selva baja caducifolia del cerro verde, Nizanda (Oaxaca), México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 76(1), 19–35. <https://www.redalyc.org/pdf/577/57707602.pdf>
- García, M. L. E., Valdés, H. J. I., Cavazos, M. L., y López, M. R. (2015). Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y Bosques*, 21(3), 69–82.
- García-Aranda, M., Estrada-Castillón, E., Cantú-Ayala, C., y Pando-Moreno, M. (2012). Clasificación de nueve sitios de bosque mixto de coníferas con presencia de *Taxus globosa* en la Sierra Madre Oriental, Nuevo León y Tamaulipas, México. *Botanical Science*, 90(1), 53–62. <https://www.scielo.org.mx/pdf/bs/v90n1/v90n1a6.pdf>
- García-De la Cruz, Y., Olivares-López, L. A., y Ramos-Prado, J. M. (2013). Estructura y composición arbórea de un fragmento de bosque mesófilo de montaña en el estado de Veracruz. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 91–101. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.025>
- Girald, V. L., Perna, A. E., Masqué, T. C., Carbonell, G. J., Calaf, V. E., Fernández, L. L., Serra, A. L., y Elorduy, V. X. (2020). *Contenido de cobre*

*en suelos de viñedo ecológicos en denominaciones de origen catalanas.*  
Acenología Revista de Enología Científica y Profesional.  
[https://www.acenologia.com/cobre\\_suelos\\_do\\_cienc174\\_0220/](https://www.acenologia.com/cobre_suelos_do_cienc174_0220/)

Gómez González, R., Palma López, D. J., Obrador Olán, J. J., y Ruiz Rosado, O. (2018). Densidad radical y tipos de suelos en los que se produce café (*Coffea arabica* L.) en Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 203–2015. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1278>

Guhl, A. (2009). café, bosques y certificación agrícola en Aratoca, Santander. *Revista de Estudios Sociales*, 114–125. <https://www.redalyc.org/pdf/815/81511766009.pdf>

Hammer, D. O., Harper, D. A. T., y Ryan, P. D. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaentología Electronica*, 4(1), 1–9.

Henao-Toro, M. C., y Hernández-Guzmán, E. (2002). Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *CENICAFE*, 53(4), 293–305.

Hill, M. O. (1973). Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology*, 54(2), 427–432. <https://doi.org/10.2307/1934352>

InaturalistMX. (2013). *iNaturalist Mexico*. <https://mexico.inaturalist.org/home>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie III. Continuo Nacional. Cartas de Uso de Suelo y Vegetación.*  
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007022>

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2006). *Precipitación Media Anual escala 1:1000000.*  
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2007). *Conjunto de datos vectoriales Temperatura Media Anual Esc. 1:1000000.*

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2017). *Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250000 Serie VI*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- Instituto Mexicano del café-NESTLÉ (INMECAFÉ-NESTLÉ). (1990). *El cultivo del cafeto en México*. Instituto mexicano del café.
- International Business Machines corp (IBM). (1989). *Statistical package for the social science (versión 22) SPSS*. (22). <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-22>
- International Union of Soil Sciences from World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB). (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015*. (1st ed., Vol. 1). FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>
- Jarquín, G. R. (2003). Agroecosistemas cafetaleros en los Altos de Chiapas. Una revisión. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 7(1), 82–92. <https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/79>
- Jing, T., Li, J., He, Y., Shankar, A., Saxena, A., Tiwari, A., Maturi, K. C., Solanki, M. K., Singh, V., Eissa, M. A., Ding, Z., Xie, J., y Awasthi, M. K. (2024). Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions - A comprehensive review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 210, 108602. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108602>
- Jost, L. (2006). *Entropy and diversity*. *Oikos*, 113(2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88(10), 2427–2439. <https://doi.org/10.1890/06-1736.1>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la

agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>

Kabata-Pendias, A., y Pendias, H. (1992). *Trace elementos in soils and plants* (3ra ed., Vol. 1). CRC PRESS.

Kharal, D. K., Meilby, H., Rayamajhi, S., Bhuju, D., y Thapa, U. K. (2015). Tree ring variability and climate response of *Abies spectabilis* along an elevation gradient in Mustang, Nepal. *Banko Janakari*, 24(1), 3–13. <https://doi.org/10.3126/banko.v24i1.13473>

Ledezma, R. 2008. Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de un software de aplicación. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology* 4(2). 51-60. <http://dx.doi.org/10.20982/tqmp.04.2.p051?>

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. In I. Olkin, G. G. Sudhist, W. Hoeffding, W. G. Madow, y H. B. Mann (Eds.), *Contributions to probability and statics: Essays in honor of Harold Hotelling* (pp. 278–292). Stanford University Press.

Ley de Productos Orgánicos, Pub. L. No. 07-02–2006, 1 (LPO) (2006). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/715333/Ley\\_de\\_productos\\_org\\_nicos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/715333/Ley_de_productos_org_nicos.pdf)

López, B. W., Castro, M. I., Salinas, C. A., Reynoso, S. R., y López, M. J. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 607–618. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342016000300607#aff1](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000300607#aff1)

López, B. W., Reynoso, S. R., López, M. J., Villar, S. B., Camas, G. R., y García, S. J. O. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 897–910. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>

- López Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez González, J. C., González-Tagle, M. A., y Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>
- Macip-Rios, R., y Casas-Andreu, G. (2008). Los cafetales en México y su importancia para la conservación de los anfibios y reptiles. *Acta Zoológica Mexicana*, 24(2), 143–159. <https://www.scielo.org.mx/pdf/azm/v24n2/v24n2a10.pdf>
- Malle, K. -G. (1992). Zink in der Umwelt. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 20(4), 196–204. <https://doi.org/10.1002/aheh.19920200404>
- Manson, R. H., López, B. F., Sosa, F. V., y Ortega, P. A. (2018). *Biodiversidad y otros servicios ambientales en cafetales. Manual de mejores practicas*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [https://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/Biodiversidad en cafetales web x.pdf](https://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/Biodiversidad%20en%20cafetales%20web%20x.pdf)
- Márquez de la Cruz, J. E., Rodríguez Mendoza, M. D. las N., García Cué, J. L., Sánchez Escudero, J., y Tinoco Rueda, J. Á. (2022). Impacto del manejo de agroecosistemas cafetaleros en la calidad del suelo en las cuatro estaciones del año en Tlapacoyan, Veracruz. *CIENCIA Ergo-Sum*, 29(2). <https://doi.org/10.30878/ces.v29n2a8>
- Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., Reyes-Sosa, M. B., y La O-Arias, M. A. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Fraillesca, Chiapas. *Revista terra latinoamericana*, 38(4), 871–881. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>
- Mata-Fernández, I., Rodríguez-Gamiño, M., López-Blanco, J., y Vela-Correa, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos . *Revista Digital E-Bios*, 1(5),

26–35.

[http://cbs1.xoc.uam.mx/e\\_bios/docs/2014/05 SALINIDAD EN SUELOS E SPANOL.pdf](http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_E_SPANOL.pdf)

Mazzola, M. B., Kin, A., Morisi, E., y Babinec, F. (2008). Efecto del gradiente altitudinal sobre la vegetación de las sierras de Lihue Calel (La Pampa, Argentina). *Boletín de La Sociedad Argentina de botánica*, 43(1), 113–119.

Medrano-Meraz, M. de J., Javier Hernández, F., Corral Rivas, S., y Nájera Luna, J. A. (2017). Diversidad arbórea a diferentes niveles de altitud en la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 57–68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.36>

Meléndez, G. L., Trabanino, F., y Caballero, R. A. (2012). Tres perspectivas en torno al uso comestible de las inflorescencias de las palmas pacay(a) y chapay(a) en Chiapas, México: enfoques paleoetnobotánico, nutricional y lingüístico. *Estudios de Cultura Maya*, 41(1), 177–199. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-25742013000100007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-25742013000100007)

Méndez-Osorio, C., Mora Donjuán, C. A., Rodríguez, E. A., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., y Pequeño Ledezma, M. A. (2018). Fitodiversidad y estructura de un bosque de pino-encino en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.236>

Millaleo, R., Reyes- Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., y Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), 470–481. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>

Moguel, P., y Toledo, V. M. (1996). El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. . *Ciencias*, 43(1), 40–51. <https://www.revistacienciasunam.com/pt/185-revistas/revista-ciencias-43/1749-el-caf%C3%A9-en-m%C3%A9xico-ecolog%C3%ADa,-cultura-ind%C3%ADgena-y-sustentabilidad.html>

- Moguel, P., y Toledo, V. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of México. *Conservation Biology*, 1, 11–21.
- Moguel, P., y Toledo, V. (2004). Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas*, 1–16.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). MyT Manuales y Tesis SEA.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., y Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(1), 1249–1261. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v82n4/v82n4a19.pdf>
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M., y Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375–398. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-42982013000400001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982013000400001)
- Muñoz-Rodríguez, M., Gómez-Pérez, D., Santoyo-Cortéz, V., y Rosales-Lechuga, R. (2019). *Los negocios del café* (1st ed., Vol. 1). Universidad Autónoma de Chapingo.
- Noulas, C., Tziouvalekas, M., y Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>
- Ongley, O. D. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos* (1st ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/w2598s/w2598s00.htm#Contents>
- Ordaz-Gallegos, J., Rodríguez, M. de las N., García Cúe, J. L., y Pimentel Equihua, J. L. (2020). Estrategias de manejo en huertas de mango y su efecto en la calidad del suelo y productividad en Los Cajones, Michoacán.

*Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1057–1068.  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2127>

Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes . *Manejo Integral Del Suelo y Manejo Vegetal* , 1(4), 1–4.  
<https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>

Paruelo, J., y Batista, W. (2006). El flujo de energía en los ecosistemas. In M. Esso, M. Aguiar, W. Batista, C. Ghera, M. Kaufan, R. León, A. Mella, M. Oesterheld, J. Paruelo, y S. Perelman (Eds.), *Fundamentos de ecología: su enseñanza con un enfoque novedoso* (1st ed.). Centro de publicaciones educativas y material didáctico S.R.L.  
<https://www.agro.uba.ar/users/batista/EE/papers/paruelo.pdf>

Pérez Hernández, J. F., Razo Zárate, R., Rodríguez Laguna, R., Capulin Grande, J., Árcega Santillán, I., y Manzur Chávez, N. (2023). Efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(80), 54–79.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1388>

Pla, L. (2006). Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 583–590.

Popma, J., Bongers, F., Martínez-Ramos, M., y Veneklaas, E. (1988). Pioneer species distribution in treefall gaps in Neotropical rain forest; a gap definition and its consequences. *Journal of Tropical Ecology*, 4(1), 77–88.  
<https://doi.org/10.1017/S0266467400002534>

Ramírez, B. V. H., Jaramillo, A. J., y Arcila-Pulgarín, J. (2013). Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia. *Manual Del Cafetero Colombiano: Investigación y Tecnología Para La Sostenibilidad de La Caficultura*, 1, 205–237.

Ramos, R. S., Pérez, O. M. A., Illescas, P. G., Cruz, R. J. A., Vibrans, H., y Flores, S. D. (2020). Diversidad y uso tradicional de árboles de sombra en cafetales

agroecológicos. *Revista de Geografía Agrícola*, 64(1), 259–273.  
<https://revistas.chapingo.mx/geografia/article/view/r.rga.2020.64.12>

Reséndiz, R. J. A., Varela, F. S. E., García, O. J., López, S. J. A., y Estrada, D. B. (2015). Contenido de materia orgánica en suelos cultivados con caña de azúcar en el Mante Tamaulipas. *27° Encuentro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica Del Golfo de México*, 58–59.  
<https://www.researchgate.net/publication/327248762> CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA EN SUELOS CULTIVADOS CON CANA DE AZUCAR EN EL MANTE TAMAULIPAS

Reyes-Reyes, J., Rodríguez Morales, J. A., Pimienta de la Torre, D. de J., Fuentes Pérez, M. A., Marroquín Morales, P., Merino García, A., y Aguirre Medina, J. F. (2022). Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1191>

Rincón, J. J., Gallardo, Y., Leal, M., y Yubisai, R. (2003). Efecto de la relación calcio: fósforo en el suelo sobre el crecimiento y nodulación de plantas. *Bioagro*, 15(2), 97–115.  
[https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-33612003000200004](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612003000200004)

Rivas, Y., OYARZÚN, C., GODOY, R., y VALENZUELA, E. (2009). Mineralización del nitrógeno, carbono y actividad enzimática del suelo en un bosque de *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst y una plantación de *Pinus radiata* D. Don. del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(1).  
<https://doi.org/10.4067/S0716-078X2009000100008>

Robles, B. H. M. (2011). *Los productores de café en México problemática y ejercicio del presupuesto*.  
[https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/documents/publication/Hector\\_Robles\\_Cafe\\_Monografia\\_14.pdf](https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/documents/publication/Hector_Robles_Cafe_Monografia_14.pdf)

- Rodríguez, M., Padilla, S., y Ferrufina, L. (2024). Breve panorama de los usos etnobotánicos del tepejilote (*Chamaedorea tepejilote*) en Honduras. *Revista Etnobiología*, 22(1). <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/593#:~:text=Chamaedorea%20tepejilote%2C%20com%C3%BAmente%20llamada%20pacaya,como%20los%20medicinales%20y%20rituales>.
- Rodríguez-Balboa, P. C., Pando-Moreno, M., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Marmolejo-Monsiváis, J. G., y Lazcano-Cortez, J. (2023). Dinámica de nutrientes en suelos del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Ciencia UANL*, 22(97), 27–37. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl22.97-1>
- Rodríguez-Toledo, L. E., Cárcamo-Mallen, R., y Álvarez, M. A. (2019). La opción de la producción orgánica ante la crisis del café: el caso de los pequeños productores de Chilón, Chiapas, México. *Sociedades Rurales, Producción y Ambiente*, 19(37), 45–72.
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E., y Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(5), 63–70. <https://www.reibci.org/publicados/2015/septiembre/1200108.pdf>
- Rosas, A. J., Escamilla, P. E., y Ruiz, R. O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana*, 375–384.
- Sadeghian, K. S. (2011). Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1), 5781–5791. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-28472011000100004#:~:text=En%20los%20cafetales%20al%20sol%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20N%20en,significativo%20para%20Mn%20y%20B](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472011000100004#:~:text=En%20los%20cafetales%20al%20sol%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20N%20en,significativo%20para%20Mn%20y%20B).

- Sadeghian, K. S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. Avances técnicos No. 466. Programa de investigación científica Fondo Nacional de café CENICAFÉ. 12p. <https://cenicafe.org/es/publications/avt0466.pdf>
- Sadeghian, K. S., y Zapata, H. R. D. (2014). Crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) durante la etapa de almácigo en respuesta a la salinidad generada por fertilizantes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 40–50. <https://doi.org/10.22267/rcia.143102.30>
- Sadeghian, S. K. (2019). Interpretación de los resultados de análisis de suelo, soporte para una adecuada nutrición de cafetales. *CENICAFÉ*, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.38141/10779/0497>
- Sadeghian, S. K., Mejía-Muñoz, B., y Arcila-Pulgarín, J. (2006). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *CENICAFE*, 57(4), 251–261.
- Salamanca, J. A., y Sadeghian, K. S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetalera de Colombia. *CENICAFE*, 56(4), 381–397.
- Salamanca, J. A., y Sadeghian, S. K. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *CENICAFÉ*, 1–8.
- Sánchez, H. S., Mendoza, B. M. A., y García, H. R. V. (2017). Diversificación de la sombra tradicional de cafetales en Veracruz mediante especies maderables. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 7–17.
- Sánchez, O. J. G., Palma-López, D. J., y Salgado, G. S. (2003). Densidad aparente en un vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia*, 28(6), 347–351. [https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000600007yscript=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000600007yscript=sci_arttext)
- Sánchez-González, A., y López-Mata, L. (2005). Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico. *Diversity*

*and Distributions*, 11(6), 567–575. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2005.00186.x>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2018, March 2). *México, onceavo productor mundial de café*. México, Onceavo Productor Mundial de Café. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (SADER) (2020, July 10). *El café una producción en manos sabias*. El Café Una Producción En Manos Sabias. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-cafe-una-produccion-en-manos-sabias>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (SADER) (2025, April 30). *Café para el Bienestar: el nuevo impulso al café mexicano desde AGRICULTURA*. SADER. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cafe-para-el-bienestar-el-nuevo-impulso-al-cafe-mexicano-desde-agricultura>

Schroth, G., Lehmann, J., Rodríguez, M. R. L., Barros, E., y Macêdo, J. L. V. (2001). Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 53(2), 85–102. <https://doi.org/10.1023/A:1013360000633>

Shannon, C. E., y Weaver, W. (1964). *The mathematical theory of communication* (W. Weaver, Ed.; First). University of Illinois.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2000). *NOM-021-RECNAT-2000*. Diario Oficial de La Federación <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280.pdf>

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014, June 26). *México posee 31 millones de hectáreas de bosques tropicales*. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-posee-31-millones-de-hectareas-de-bosques-tropicales-9977>

- Shapiro, S. S., y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Anuario estadístico de la producción agroalimentaria*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva-Aparicio, M., Francisco Olgún, C., y Jesús Cruz, S. (2024). Árboles asociados a los cafetales en comunidades de la Montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(83), 80–106. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i83.1420>
- Silver, W. L., Pérez, T., Mayer, A., y Jones, A. R. (2021). The role of soil in the contribution of food and feed. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834), 20200181. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0181>
- Sotelo Ruiz, E. D., González Hernández, A., Cruz Bello, G., y Flores López, R. (2020). Actualización de la cartografía edafológica del Estado de México: una herramienta para la planeación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1775–1788. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1975>
- Soto-Pinto, L., Romero-Alvarado, Y., Caballero-Nieto, J., y Segura, S. W. (2001). Woody plant diversity and structure of shade-grown-coffee plantations in Northern Chiapas, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 49(3–4), 977–987.
- Tan, Z. X., Lal, R., y Wiebe, K. D. (2005). Global Soil Nutrient Depletion and Yield Reduction. *Journal of Sustainable Agriculture*, 26(1), 123–146. [https://doi.org/10.1300/J064v26n01\\_10](https://doi.org/10.1300/J064v26n01_10)
- Tapia-Torres, Y., y García-Oliva, F. (2012). La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: Una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 231–242. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792013000400231#B58](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000400231#B58)

- United States Department of Agriculture (USDA). (2011). *Soil Quality Indicators*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>
- United States Department of Agriculture (USDA) (2024, May 17). *México: Anuario del Café*. Department of Agricultura. <https://www.fas.usda.gov/data/mexico-coffee-annual-8>
- Vázquez-Yanes, C., y Orozco-Segovia, A. (1992). El Bosque Lluviosa en America Tropical: dinámica Forestal, Reforestación, Manipulación de la Semillas y Problemas de Manejo. *Tree Planters' Notes*, 43(4), 119–124. <https://rngr.net/publications/tpn/43-4/el-bosque-lluviosa-en-america-tropical-dinamica-forestal-reforestacion-manipulacion-de-la-semillas-y-problemas-de-manejo/?searchterm=>
- Venegas Sandoval, A., Soto Pinto, L., Herrera, O. B., y Álvarez Gordillo, G. (2020). Transformaciones de la caficultura en Chiapas: un análisis de las crisis desde la perspectiva del ciclo de renovación adaptativa. *Sociedad y Ambiente*, 23, 1–31. <https://doi.org/10.31840/sya.vi23.2188>
- Verdugo-Morales, E. G., Alanís-Rodríguez, E., Cuellar-Rodríguez, C., Yerena-Yamallel, I., Collantes-Chavez-Costa, A., y Silva-García, J. E. (2022). Composición, estructura y diversidad Arborea en gradiente altitudinal en un bosque mesófilo de montaña la Sierra Madre de Chiapas. *Interciencia*, 42(7), 218–224.
- Vignola, R., Harvey, C. A., Bautista-Solis, P., Avelino, J., Rapidel, B., Donatti, C., y Martínez, R. (2015). Ecosystem-based adaptation for smallholder farmers: Definitions, opportunities and constraints. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 211, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.05.013>
- Villarreyna, R., Jaques, A., y Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: Efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 499–515.

- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., y Tilman, D. G. (1997). Technical Report: Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Sources and Consequences. *Ecological Applications*, 7(3), 737. <https://doi.org/10.2307/2269431>
- Walker, T. W., y Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(76\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5)
- World Coffee Research (WCR). (2023). *Arabica and Robusta Coffee Varieties Poster*. World Coffee Research.
- West, R. M. (2022). Best practice in statistics: The use of log transformation. *Annals of Clinical Biochemistry: International Journal of Laboratory Medicine*, 59(3), 162–165. <https://doi.org/10.1177/00045632211050531>
- World Flora Online (WFO). (2024, November 11). *World Flora Online*.
- Wiend, T. L. (2007). *Magnesium in soil and plants*. Agronomic Information.
- Williams-Linera, G., Pérez-García, I., y Tolomé, J. (1996). El bosque mesófilo de montaña y un gradiente altitudinal en el Centro de Veracruz, México. *La Ciencia y El Hombre*, 23(1), 149–161. <https://cdigital.uv.mx/items/1d5a3a59-ae5d-4067-b820-42d1b5ca790b>
- Woerner, M. (1989). *Método químico para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas* (Vol. 1). Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Agroforestal, Universidad Autónoma de Nuevo León.