



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Instituto de Ciencias

Posgrado en Ciencias Ambientales

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

*“Análisis de la sustentabilidad de los cafetales
de la cooperativa Taposontok, Cuetzalan del
Progreso, Puebla”*

TESIS

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias Ambientales

Presenta:

Carol Meritxell Molina Monteleón

Directora: Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega

Codirectora: Dra. Amparo Mauricio Gutiérrez

Noviembre 2024

AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de la Cooperativa Taposontok en Cuetzalan del Progreso, por abrirme sus puertas y permitirme colaborar con ellos, sin su apoyo y disposición, este trabajo no habría sido posible.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado para realizar los estudios de Maestría.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) y al Instituto de Ciencias (ICUAP) por el apoyo económico para la participación en congresos.

Al Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas (CICA) y su personal, por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones. Agradezco especialmente al maestro Cesar Calderón por su apoyo y paciencia durante el trabajo de laboratorio, a los profesores Abel Cruz, Eréndira Corona, y a los chicos del laboratorio: Carlos, Gerardo, Jonathan, Jafet, Katia y Lupita por su apoyo, compañía y pláticas que alegraron el trabajo día a día.

Al Dr. Víctor Tamariz por compartir su tiempo y conocimiento durante el trabajo de campo y laboratorio.

Al laboratorio de Hongos Comestibles y Patología Vegetal del CENAGRO por permitirme realizar parte del trabajo dentro de sus instalaciones, al Dr. Omar Romero, Alejandro y Adrián que me acompañaron y apoyaron durante mi estancia en su laboratorio.

A los miembros del Comité Tutoral y el Jurado: Dra. Edith Chávez Bravo, Dr. Eduardo Torres Ramírez, Dr. Ángel Bustamante González, Dra. Lucía López Reyes, Dr. Ricardo Darío Peña Moreno, Dra. María Elena Ramos Cassellis, gracias por sus valiosas aportaciones durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la Dra. Rosalía Castelán Vega por sus palabras de apoyo, paciencia y acompañamiento a lo largo de esta investigación, gracias por ser guía e inspiración, estoy profundamente agradecida por su apoyo y todo lo que he aprendido bajo su dirección.

A la Dra. Amparo Mauricio Gutiérrez por el tiempo dedicado y la confianza depositada en mí, gracias por motivarme en cada paso de este camino, por inspirarme e impulsarme a dar siempre lo mejor.

DEDICATORIA

A Iván, por ser mi compañero de vida y por el apoyo incondicional, este logro es tanto mío como tuyo, gracias por estar siempre a mi lado.

A mi hermana Araxie, por ser mi mejor amiga, acompañarme incondicionalmente y por impulsarme a ser mejor, a Erick por su amistad y apoyo, sin ustedes la vida no sería la misma.

A mi madre, gracias por tu cariño, por creer en mí y motivarme a seguir adelante.

A mi padre, por todo el apoyo constante que me ha brindado y celebrar cada avance.

A Twenty One Pilots por acompañarme y motivarme con su música en cada etapa de este proceso.

A Ceci y Ricardo por su amistad, sus consejos y los momentos compartidos estos dos años.

A mi familia, mis amigos, compañeros del posgrado y todas aquellas personas que, de alguna forma, contribuyeron a este logro. Mi gratitud es inmensa para cada uno de ustedes, gracias por acompañarme en este camino y animarme cuando lo necesitaba.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	10
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.5 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.6 HIPÓTESIS	10
1.7 JUSTIFICACIÓN	11
CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA	12
2.1 EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD.....	12
2.2 EL MARCO DE EVALUACIÓN MESMIS	13
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE CAFÉ.....	13
2.4 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO.....	14
2.5 IMPACTO AMBIENTAL DEL CAFÉ.....	15
2.6 PANORAMA DEL CAFÉ EN MÉXICO	15
2.7 MÉTODOS DE CULTIVO DE CAFÉ EN MÉXICO.....	17
2.8 CAFÉ EN EL ESTADO DE PUEBLA	21
2.9 SALUD Y CALIDAD DEL SUELO.....	21
2.10 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SUELO	21
2.11 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL SUELO	23
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1 MUNICIPIO DE CUETZALAN DEL PROGRESO	24
3.2 COOPERATIVA TAPOSONTOK.....	25
CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
4.1 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA.....	26
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
4.3 MEDICIÓN Y MONITOREO DE LOS INDICADORES.....	26
4.3.1 TOMA DE MUESTRAS	29
4.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS	30
4.4 ANÁLISIS DE LA SALUD DEL SUELO Y DE LA PLANTA	36
4.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	37

4.6 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS	38
Bacterias totales	38
Hongos y actinomicetos	38
Bacterias nitrificantes	40
Bacterias desnitrificantes	40
4.7 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO	41
4.8 ANÁLISIS FOLIAR	46
4.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	47
4.9 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS	47
4.10 ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	48
CAPÍTULO V. RESULTADOS	49
5.1 PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS	49
5.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	52
5.3 NUTRICIÓN VEGETAL	54
5.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	56
5.5 SALUD DEL SUELO Y NUTRICIÓN VEGETAL	57
5.6 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS	59
5.7 ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD	65
5.8 REGRESIÓN LOGÍSTICA BINARIA	74
5.9 MONOCULTIVO BAJO SOL	77
5.10 POLICULTIVO COMERCIAL	78
5.11 POLICULTIVO TRADICIONAL	79
5.12 MONOCULTIVO BAJO SOMBRA	80
5.13 RUSTICANO	81
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN	82
6.1 DIMENSIÓN AMBIENTAL	82
6.2 DIMENSIÓN SOCIAL	83
6.3 DIMENSIÓN ECONÓMICA	84
CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	95

FIGURAS

Figura 1. Distribución de la producción nacional de café cereza.....	16
Figura 2. Métodos de cultivo de café en México	18
Figura 3. Uso de suelo y vegetación del municipio de Cuetzalan.....	24
Figura 4. Logo de la cooperativa Taposontok.....	25
Figura 5. Fases de la metodología.....	26
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo.....	29
Figura 7. Muestreo de suelo.....	27
Figura 8. Muestreo de hoja.....	30
Figura 9. Monocultivo bajo sol.....	30
Figura 10. Policultivo comercial.....	33
Figura 11. Monocultivo bajo sombra.....	30
Figura 12. Rusticano.....	34
Figura 13. Policultivo tradicional.....	35
Figura 14. Humedad y materia orgánica en el suelo.....	31
Figura 15. Presencia de enfermedades en el cafeto (roya).....	35
Figura 16. Secado de muestras.....	37
Figura 17. Crecimiento de bacterias.....	38
Figura 18. Diversidad morfológica de hongos y actinomicetos de los diferentes manejos de cultivo de café.....	39
Figura 19. Inoculación del medio de cultivo.....	36
Figura 20. Incubación.....	40
Figura 21. Presencia de burbuja en campana Durham (crecimiento positivo).....	41
Figura 22. Determinación de densidad aparente.....	42
Figura 23. Determinación de pH y conductividad en solución.....	42
Figura 24. Cuantificación de materia orgánica.....	43
Figura 25. Destilación por el método Kjeldahl.....	43
Figura 26. Determinación de textura.....	44
Figura 27. Preparación del extracto para la determinación de fósforo.....	44
Figura 28. Determinación de bases intercambiables con espectrofotometro de absorción atómica.....	45
Figura 29. Preparación del extracto para determinación de micronutrientes.....	45
Figura 30. Determinación de micronutrientes mediante espectrofotometría de absorción atómica.....	46
Figura 31. Secado de las muestras de las hojas.....	41

Figura 32. Trituración de la muestra seca.....	46
Figura 33. Digestión de la muestra.....	47
Figura 34. Análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica.....	47
Figura 35. Aplicación de entrevistas a miembros de la cooperativa Taposontok.	48
Figura 36. Análisis de componentes principales para los 5 métodos de cultivo.	56
Figura 37. Análisis de componentes principales (PCA) para los nutrientes en hoja, propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo.....	57
Figura 38. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Monocultivo Bajo Sol	78
Figura 39. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Policultivo Comercial	79
Figura 40. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Policultivo Tradicional	80
Figura 41. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Monocultivo Bajo Sombra	81
Figura 42. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Rusticano	82
Figura 43. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Ambiental	83
Figura 44. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Social...	84
Figura 45. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Económica	85

TABLAS

Tabla 1. Indicadores y criterios de diagnóstico	28
Tabla 2. Características de los sistemas de producción de café	32
Tabla 3. Valores de fragmentos gruesos.....	37
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del suelo por método de manejo	53
Tabla 5. Propiedades de las hojas del cafeto por sistema de manejo	55
Tabla 6. Principales resultados de los indicadores socioeconómicos.....	62
Tabla 7. Forma de Medición o Estimación de Indicadores	65
Tabla 8. Escala para la edad del cultivo de café.....	66
Tabla 9. Escala para otras especies vegetales.....	67
Tabla 10. Escala para incidencia de plagas y enfermedades	67
Tabla 11. Escala para los nutrientes del indicador nutrición del cafeto	67
Tabla 12. Puntaje de nutrición vegetal	68
Tabla 13. Escala para las propiedades de salud del suelo	69
Tabla 14. Puntaje de salud del suelo.....	69
Tabla 15. Escala para uso de fertilizantes y plaguicidas	70
Tabla 16. Definición de valores óptimos y cálculo de valores ponderados de los indicadores de sustentabilidad	72
Tabla 17. Resultados de Tablas Cruzadas y Regresión Logística Binaria	75
Tabla 18. Población de bacterias, hongos y actinomicetos por manejo. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0.05$).....	96

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El café es un cultivo de gran importancia a nivel nacional, México actualmente se ubica como el décimo productor a nivel mundial, con una producción estimada de 3.8 millones de quintales y representando 0.66% del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola nacional (SAGARPA, 2017), el estado de Puebla fue responsable del 17.4% de la producción anual de café durante el ciclo cafetalero 2021/22 (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022). Sin embargo, su importancia va más allá de su nivel de producción, el cultivo de café ha sido testigo de la historia cultural, ambiental y social del país, puesto que entre los productores se encuentran aquellos que producen a pequeña escala, población perteneciente a algún pueblo originario, además, la producción de café en México juega un papel fundamental en las economías locales y preservación de saberes.

En los últimos años, a raíz de la crisis ambiental y los evidentes efectos negativos que tiene la agricultura sobre el medio ambiente, se ha generado interés en desarrollar formas no destructivas o lo que podríamos llamar “sustentables” para producir los alimentos. El café es uno de los cultivos que posee las características que lo acercan a la sustentabilidad: imita la estructura, biodiversidad y ciclo de nutrientes del bosque, con una producción de hojarasca muy alta, y una mínima producción primaria del estrato herbáceo, presenta una baja susceptibilidad a la erosión edáfica y un ambiente físico mucho más estable (Toledo & Moguel, 1999), pero incluso con estas características, el cultivo de café puede tener un impacto negativo sobre el medio ambiente, es una fuente de contaminación del agua y el suelo por el uso de agroquímicos y deforestación (Fernández-Cortés et al., 2020).

Frente a este panorama de complejidad, se han desarrollado metodologías que permitan cuantificar y evaluar la sustentabilidad, para el sistema de producción de café es necesario utilizar herramientas metodológicas que permitan identificar los puntos críticos del sistema. En el presente trabajo de investigación se analizó el nivel de sustentabilidad de los sistemas cafetaleros de la cooperativa Taposontok del municipio de Cuetzalan del Progreso, Puebla utilizando indicadores socioambientales bajo el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, México se ubica en la décima posición de producción de café, con el 2.3% del volumen mundial. Sin embargo, a diferencia de lo que se observa en la producción, cuyo dinamismo se ha visto reducido en los últimos diez años, el consumo registra un incremento promedio anual de 1.5%. Su producción se ve afectada por heladas, sequías, el costo de los fertilizantes químicos, fenómenos meteorológicos, plagas y aumento en la temperatura (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022). Sumándole a estos problemas, la descapitalización del café y la pérdida de rentabilidad lo hacen un cultivo altamente riesgoso, si se le añade la falta de estímulos a la producción, la caída de los precios y la eliminación de subsidios, están llevando a una sustitución de las áreas productoras de café por cultivos como caña de azúcar y cítricos, cuando no se utilizan estos terrenos para la ganadería. Los productores que pueden cambiar de actividad descuidan las parcelas o las abandonan. Entre otros desafíos está su ubicación: los predios cafetaleros en México se caracterizan por localizarse en zonas de difícil acceso, por tener profundos rezagos en infraestructura básica y fuerte presencia de población que vive en pobreza extrema, y más de la mitad de sus productores hablan al menos una lengua indígena (Figuroa-Hernández et al., 2015).

Los problemas presentados anteriormente pueden ser estudiados mediante el análisis de la sustentabilidad de los sistemas de producción; sin embargo, esto presenta muchos retos desde el punto de vista conceptual y metodológico, puesto que los sistemas ambientales son dinámicos y multifactoriales. En la última década, el concepto de sustentabilidad se ha establecido como un eje fundamental para el diseño y análisis de sistemas de manejo de recursos naturales (Astier et al., 2008), permitiendo la evaluación de sistemas agrícolas mediante el uso de indicadores, que hacen posible la identificación de los puntos críticos, fortalezas y áreas de oportunidad.

En la zona de estudio, que pertenece a la cooperativa Taposontok del municipio de Cuetzalan del Progreso, no existe suficiente información para poder establecer el grado de sustentabilidad de los agroecosistemas cafetaleros ni sus puntos críticos. Por lo que el presente trabajo de investigación es fundamental para obtener datos actualizados que permitan conocer el estado actual de los sistemas, comparar los efectos de los diferentes métodos de manejo sobre la salud del suelo y de la planta, para así, proporcionar a los agricultores y tomadores de decisiones las herramientas científicas que les ayuden a obtener un nivel aceptable de sustentabilidad en los sistemas de producción.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- Analizar la sustentabilidad de los diferentes sistemas cafetaleros en la cooperativa Taposontok del municipio de Cuetzalan del Progreso.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el estado de la salud de los cafetales por medio del balance nutricional de la relación microbiota-suelo-planta.
- Relacionar la rentabilidad de los cafetales con la satisfacción de las necesidades básicas de los productores.
- Medir el grado de sustentabilidad de los sistemas cafetaleros con la metodología MESMIS.
- Comparar el grado de sustentabilidad de los diferentes sistemas de manejo de cultivo de café.

1.5 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es el estado actual de la salud del suelo y de la planta de café en la cooperativa Taposontok?
- ¿Qué relación existe entre la rentabilidad de los cafetales con la satisfacción de las necesidades básicas de los productores?
- ¿Cuál es el grado de sustentabilidad que tienen los diferentes sistemas cafetaleros establecidos en la cooperativa Taposontok?
- ¿Cuál tipo manejo de cultivo presenta un grado más alto de sustentabilidad?

1.6 HIPÓTESIS

Los cafetales de la cooperativa Taposontok manejados con sistema de Rusticano tienen mayor grado de sustentabilidad que aquellos que se encuentran bajo sol, debido a que presentan un mejor estado de salud del suelo y condiciones nutrimentales de la planta, la rentabilidad es mayor y se cubre la satisfacción de las necesidades básicas de los productores.

1.7 JUSTIFICACIÓN

La agricultura es una actividad indispensable para la alimentación del ser humano; sin embargo, ha causado un gran impacto al medio ambiente, como la deforestación, erosión de los suelos, pérdida de la biodiversidad, disminución y contaminación de las reservas de agua, contaminación por agroquímicos, emisión de gases de efecto invernadero y la desertificación (Barchuk et al., 2020). Debido a esto, se le ha dado mayor importancia a los efectos que tienen las prácticas agrícolas en el medio ambiente. En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, n.d.), 3 de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) hacen referencia a prácticas agrícolas: En el objetivo 2 se promueve la agricultura sostenible, el objetivo 12 está enfocado en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles y el objetivo 15, está enfocado en gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

El café es uno de los principales *commodities* comercializados en el mercado internacional y México se ubica como el décimo productor mundial, a nivel nacional los principales productores son los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca y Guerrero. Se estima que el 90% de los productores son de pequeña escala con superficies cultivadas que no sobrepasan las 2 hectáreas. Por otra parte, el cultivo es un importante generador de mano de obra, especialmente en las temporadas de cosecha. Asimismo, se considera que el 65% de los productores pertenecen a poblaciones originarios (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022).

En la región de Cuetzalan del Progreso en el estado de Puebla, las tierras dedicadas a la producción de café son altamente susceptibles a las alteraciones del clima, como las precipitaciones y las temperaturas, situación que afecta principalmente a los pequeños productores de café. Los escenarios climáticos indican un panorama complicado para la producción de café, con consecuencias drásticas en la vida de los productores en aspectos de cambio de uso de suelos, costos económicos y migración; sin embargo, debido a la situación de pobreza y marginación en que se encuentran la mayoría de los cafecultores es necesario explorar alternativas productivas que beneficien su calidad vida (Guerrero, 2020).

La cafecultura en Puebla tiene gran importancia social y económica; sin embargo, en la zona de estudio existe escasez de información respecto a la sustentabilidad de los sistemas cafetaleros de la cooperativa Taposontok, aquí recae la importancia de la realización del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA

2.1 EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

Desde sus inicios, la sustentabilidad se ha caracterizado como un concepto complejo y en constante cambio, que nace de la necesidad de cambiar el modelo actual de desarrollo humano para encontrar un equilibrio entre lo social, lo ambiental y lo económico. Sustentabilidad se puede definir como la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas, con el objetivo de avanzar hacia una relación diferente entre la economía, el ambiente y la sociedad. No pretende frenar el progreso ni volver a estados primitivos, todo lo contrario, busca fomentar un progreso, pero desde un enfoque diferente y más amplio (Calvente, 2007).

Este concepto está pasando rápidamente de ser abstracto a un estado medible de la dinámica de los sistemas humano-ecológicos. La Huella Ecológica, el Producto Interno Bruto, el PIB Verde, el Índice de Desarrollo Humano, entre otras, entregan información de la evolución de la sustentabilidad a distintas macro escalas, además de permitir la visualización de la inequidad entre naciones (Toro et al., 2010). El objetivo de la evaluación de sustentabilidad es proporcionar a los encargados de adoptar decisiones, una valoración de ámbito local a global que integre los sistemas de naturaleza y sociedad a corto y largo plazo, a fin de ayudar a determinar qué acciones deben o no ser emprendidas para favorecer una sostenible relación entre sistemas (Kates et al., 2001).

Para abordar la evaluación de sustentabilidad en un agroecosistema es fundamental centrarse en las características básicas del concepto y determinar cómo son afectadas dentro de cada dimensión (Toro et al., 2010). Para esto, los métodos de evaluación de la sustentabilidad se apoyan en el uso de índices e indicadores.

Un índice es una agregación cuantitativa de indicadores que puede proporcionar una visión simplificada, coherente y multidimensional de un sistema, lo que resulta muy útil para centrar la atención y, a menudo simplificar el problema (Toro et al., 2010). Por otro lado, los indicadores describen un proceso específico o un proceso de control; por lo tanto, son particulares a los procesos de los que forman parte. Los indicadores concretos dependerán de las características del problema específico bajo estudio, de la escala del proyecto, del tipo de acceso y de la disponibilidad de los datos (Masera et al., 2000).

La evaluación de la sustentabilidad en ecosistemas agrícolas y pecuarios debe ser enfocada desde sus tres dimensiones (económica, social y ambiental). En la dimensión económica deben evaluarse la rentabilidad, los márgenes de producción, costos medios, gastos en alimentación e insumos sanitarios y los costos en mano de obra. Dentro de la dimensión social, destaca la generación de empleo, las condiciones de trabajo y, con ello, la disminución de la tasa de inmigración en sectores rurales. Finalmente, la evaluación de la sustentabilidad

en la dimensión ecológica o ambiental se orienta a determinar el impacto del manejo de cultivos y la producción pecuaria en los recursos agua, suelo y aire. Se debe señalar, que dentro de la dimensión económica se encuentran en forma implícita los aspectos técnicos de la producción; por lo tanto, esta dimensión será enfocada como una dimensión técnico-económica (Toro et al., 2010).

2.2 EL MARCO DE EVALUACIÓN MESMIS

El marco de evaluación MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad) es una herramienta metodológica para la evaluación de la sustentabilidad, permite derivar indicadores que reflejen el comportamiento de los aspectos más relevantes de un sistema de manejo y, muestren las tendencias del sistema para alcanzar los diferentes objetivos de los sistemas sustentables (Maserá et al., 2000). Esta herramienta, propone un proceso de análisis y retroalimentación en el que se brinda una reflexión crítica destinada a mejorar las posibilidades de éxito de las propuestas del sistema de manejo que surgen de la intersección de los procesos ambientales con los ámbitos social y económico. El MESMIS presenta una estructura flexible para adaptarse a diferentes niveles de información y capacidades técnicas disponibles localmente, e implica un proceso de evaluación participativo que enfatiza dinámicas de grupo y una retroalimentación constante del equipo evaluador (Astier et al., 2008).

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE CAFÉ

El café pertenece al género *Coffea* y a la familia de las rubiáceas. Existen numerosas especies de cafeto y diferentes variedades de cada especie. Las especies más importantes comercialmente pertenecientes al género *Coffea* son conocidas como *Coffea arabica* Linneo (conocida como Arábica o Arábiga) y *Coffea canephora* Pierre Ex Froehner (conocida como Robusta) (Durán, 2019).

El cafeto es un arbusto o árbol pequeño, perennifolio, de tronco recto que puede alcanzar los 10 metros en estado silvestre; en los cultivos se les mantiene normalmente en tamaño más reducido, alrededor de 3 metros. El sistema radicular es superficial estando el 60.0% en los primeros 30 centímetros, de profundidad y la raíz pivotante puede llegar a más de un metro de profundidad (Durán, 2019).

Las hojas son opuestas y alternas en el tallo ortotrópico y en ramas plagiotrópicas son opuestas, son de color verde oscuro y brillante en la parte superior y verde claro en el interior, tienen forma oval y terminan en punta, sus bordes son ondulados; Las hojas nuevas presentan una coloración bronceada o verde claro y después toman su coloración definitiva. Sus flores se localizan en las axilas de las hojas de las ramas plagiotrópicas, la corola es blanca y

formada por cinco pétalos fusionados en su base, dando origen al tubo de la corola; el cual se encuentra inserto en la parte superior del ovario. El fruto es una drupa de superficie lisa y brillante, de pulpa delgada fácilmente desprendible del pergamino, cuando maduran los frutos son rojos o amarillos, con dos semillas. El café cereza se compone de la pulpa y café pergamino, la pulpa está formada por el epicarpio correspondiendo al 46% del fruto; Las semillas son oblongas, plano convexas, representan del 35.0 al 38.0% del fruto del café, están constituidas por el endocarpio (Figueroa-Hernández et al., 2015).

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

Las necesidades de las condiciones ambientales, como con todas las plantas, varían dependiendo de la especie, pero de manera general las condiciones para el cultivo del café, de acuerdo con Figueroa-Hernández et al., 2015 son:

- **Temperatura:** debe ser entre los 17 a 26°C. La temperatura es muy importante porque si es menor a 16 grados se pueden quemar los brotes, y si sobrepasa los 27 grados hay más riesgo de deshidratación de la planta con reducción de la fotosíntesis.
- **Altura:** La altura apropiada para la producción del café es de entre 900 a 1600 metros sobre el nivel del mar. Si se cultiva a menor altura, los costos de producción aumentan, ya que se reduce la calidad de los granos de café. En cambio, si se cultiva a mayor altura de la aconsejada, se produce un menor crecimiento de las plantas.
- **Vientos:** Si los vientos superan los 30 Km/h se produce un daño en la planta con la caída de hojas, rotura de flores y frutos y deshidratación de las yemas.
- **Lluvias:** El rango establecido de precipitaciones necesarias para la producción de café está entre 1,000 a 3,000 milímetros/año. Si llueve más se producen hongos, y si reciben menos lluvias la producción disminuye, porque se reduce el crecimiento de las plantas de café.
- **Humedad:** Si la humedad relativa es mayor a 90.0% hay riesgo de que la planta se enferme con hongos. Por ello, se aconseja que el ambiente tenga entre un 65.0 a 90.0% de humedad.

Las características del suelo necesarias para el crecimiento de la planta de acuerdo con Durán, 2019 son:

- Suelo (suelo-subsuelo) profundo y flojo, pero que tenga buen drenaje. Estas condiciones se encuentran por lo general, en aluviones, conos de escombros y cenizas volcánicas.
- Tipo de suelo francos, que tienen en igual proporción los contenidos de arena, limo y arcilla.
- Los suelos de color oscuro son los mejores para el café ya que tienen buen contenido de materia orgánica.

- La mejor estructura para el café es la granular, porque las raíces crecen y penetran con facilidad y las plantas encuentran los nutrientes y el agua.
- Un suelo para café es profundo si permite la penetración de las raíces hasta 80 cm. A mayor profundidad efectiva del suelo mejor será el desarrollo radical.
- Los suelos buenos para cafetales tienen un contenido de materia orgánica superior al 8%.
- pH con un valor entre 5 y 5.5. Al café no le convienen suelos con valores de la acidez por debajo de 5 o por encima de 5.5, pues se dificulta la nutrición del cultivo.
- Macronutrientes: Nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) (Solórzano, 2019).
- Micronutrientes: Boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), zinc (Zn), cloro (Cl) (Solórzano, 2019).

2.5 IMPACTO AMBIENTAL DEL CAFÉ

El 99.0% de las plantaciones de café en el país se cultivan bajo sombra y además, existe una alta proporción de cafetales de montaña y sistema tradicional, por lo que los beneficios de los cafetales sobre el medio ambiente son muy significativos. Entre estos beneficios se encuentran captura de carbono y agua, conservación de suelos y de la biodiversidad (Figueroa-Hernández et al., 2015).

No obstante, la producción de café no tiene solo beneficios para el medio ambiente, las actividades de cafecultura generan contaminación en el agua al descargar la pulpa en los ríos, modificando fuertemente su acidez natural, agotando el oxígeno disuelto en ella y destruyendo por asfixia la biodiversidad acuática, entre otros efectos. De igual forma, genera transformaciones en el paisaje, deforestación para sostener la expansión agrícola y cambios en la calidad del suelo y el agua por el uso de agroquímicos (Fernández-Cortés et al., 2020).

2.6 PANORAMA DEL CAFÉ EN MÉXICO

La planta del café, originaria de África Oriental llegó a México en el año de 1796 por la región de Córdoba, Veracruz y posteriormente, se introdujeron otras plantas al estado de Michoacán en 1823 y Chiapas en 1847 (Figueroa-Hernández et al., 2015). Hoy en día, el cultivo y producción de café está presente en 14 entidades ubicadas principalmente en el sureste del país, puesto que el 80% de la superficie cosechada se concentra en los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla, mientras que en los estados de México, Tabasco y Querétaro solo se ubica el 0.2% de la superficie cosechada a nivel nacional (Figura 1) (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022).

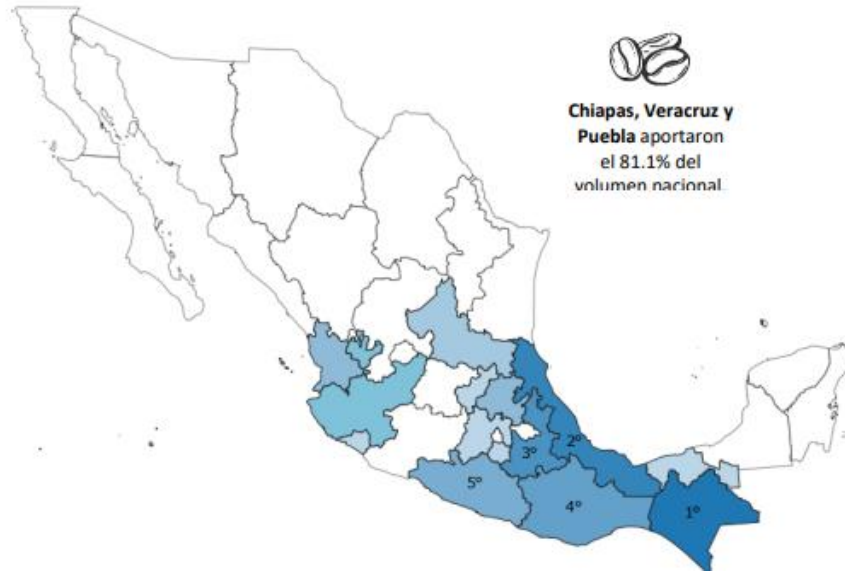


Figura 1. Distribución de la producción nacional de café cereza (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022).

México lleva cultivando café por más de 200 años (Figuroa-Hernández et al., 2015) y actualmente se ubica como el décimo productor mundial, con una producción estimada de 3.8 millones de sacos y con un incremento anual en la producción de 5.9%. Durante el ciclo 2021/22 el cultivo de café generó un valor de \$5,210 millones de pesos, con lo cual, se ubicó en el lugar 32 entre los cultivos cíclicos y perennes. Sin embargo, por superficie cosechada, se ubicó en la sexta posición con 641 mil hectáreas, mismas que representaron el 3.1% de la superficie total (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022).

La producción de café destaca en México, por su importancia social, económica y ambiental. En efecto, incluyendo a los productores, jornaleros, operadores de beneficios, obreros de industrias, empleados de cafeterías y participantes en la comercialización y sus familias; alrededor de tres millones de mexicanos dependen del café, en algún grado. Por su relevancia económica, figura en promedio como el primer producto individual de exportación y en las regiones productoras, es un elemento fundamental en las economías locales (Figuroa-Hernández et al., 2015). Del total de productores a nivel nacional, se estima que el 90 son de pequeña escala con superficies que no sobrepasan las 2 hectáreas. Además, el cultivo es un importante generador de mano de obra y se considera que el 65% de los productores pertenecen a poblaciones indígenas (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022) y la cafeticultura es la fuente principal de ingresos para al menos 17 pueblos originarios del país (Figuroa-Hernández et al., 2015).

Además, por las características climáticas y topográficas que requiere cultivo, el café se ubica en zonas serranas de escasas comunicaciones y, por lo tanto, marginadas. Esta marginación no significa aislamiento de los mecanismos económicos del mercado mundial y de los centros

industriales y financieros del país, puesto que es un cultivo cien por ciento comercial y en una gran proporción destinado a la exportación (Paré, 1990).

Respecto al consumo del café en México, se registró un crecimiento medio anual de 1.5% en la década reciente. La demanda está caracterizada principalmente por el consumo en los hogares y por el consumo en el canal HORECA (Hoteles, Restaurantes y Cafeterías), la producción nacional satisface la demanda interna, por lo que México es autosuficiente en el consumo del aromático (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022).

2.7 MÉTODOS DE CULTIVO DE CAFÉ EN MÉXICO

En México, el café se produce fundamentalmente en las vertientes de las cadenas montañosas, bajo la cubierta de un docel de árboles y por pequeños productores, generalmente de comunidades indígenas o mestizas. Lo anterior como resultado de la historia agraria y cultural del país, donde la sabiduría indígena se apropió de un cultivo exótico, para adoptarlo y adaptarlo a los sistemas agroforestales nativos (Toledo & Moguel, 1996). Los sistemas de producción en México se clasifican en torno a la estructura del cafetal (incluyendo los diferentes estratos de especies vegetales presentes), el manejo del cafetal (Considerando los labores y prácticas necesarias para mantener su productividad) y el tipo de productor (definido por sus características socioeconómicas). A partir de la clasificación, se identifican subconjuntos más o menos homogéneos para caracterizar el sistema de producción de café mexicano, en los que se ilustran las formas productivas campesinas como los cafetales de montaña y tradicionales, además de las derivadas del proceso de intensificación e industrialización de la producción, como los monocultivos y las plantaciones a pleno sol (Manson et al., 2008). De acuerdo con lo anterior, en México se pueden distinguir cinco grandes sistemas productivos de café (Toledo & Moguel, 1996; Escamilla & Díaz, 2002):

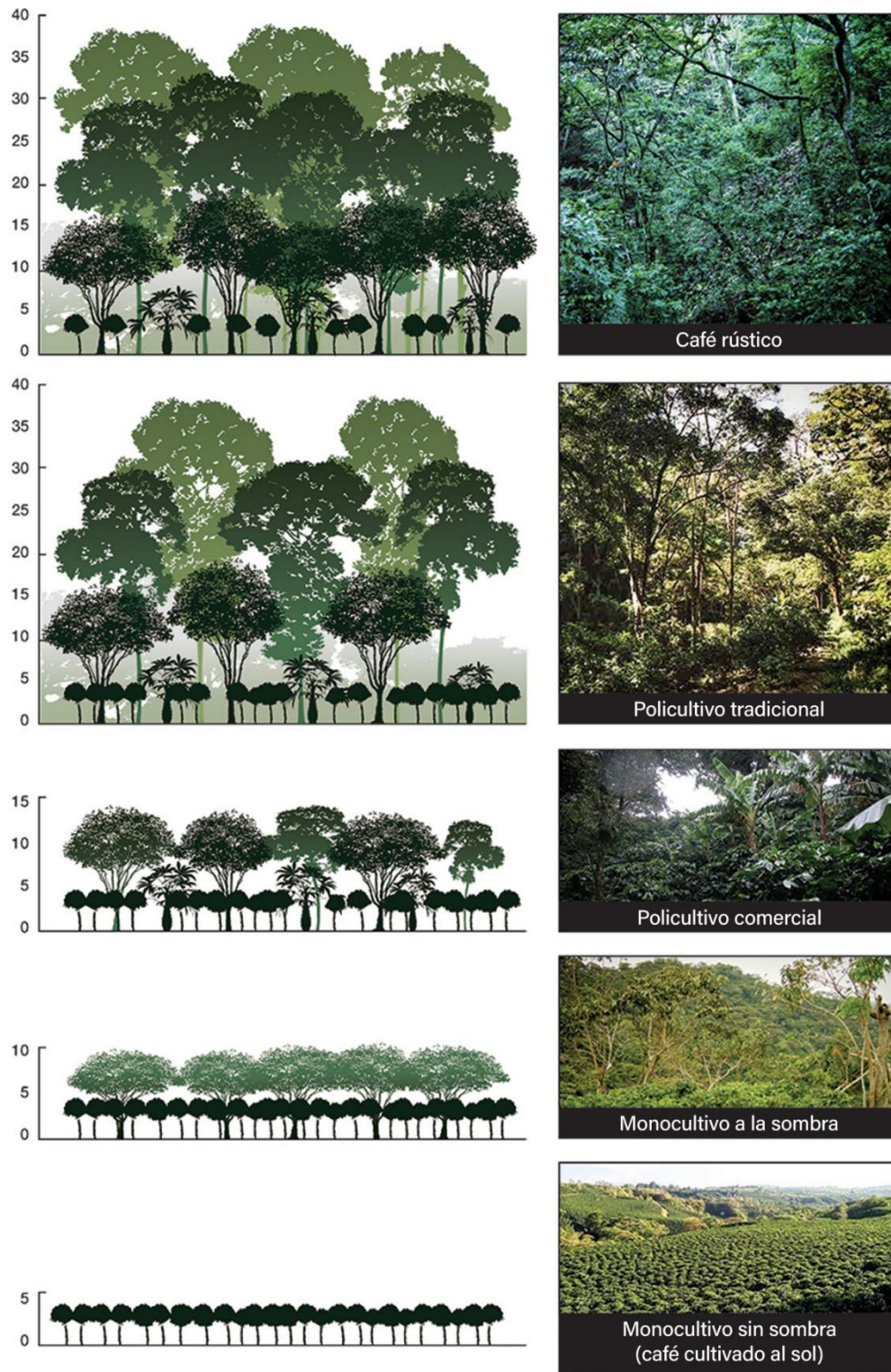


Figura 2. Métodos de cultivo de café en México (Perfecto et al., 2019).

- **Sistema rusticano, de montaña o natural:** Con este sistema se inició la producción de café en México, imitando la orientación de la naturaleza. Consiste en la sustitución de las plantas del piso de las selvas o bosques por matas de café, presentando una mínima afectación al ecosistema forestal, mediante la sola remoción del estrato bajo de la selva o del bosque, lo que supone el mantenimiento de la cubierta original de árboles, debajo de la cual simplemente se implantan los arbustos de café. Se presenta una gran diversidad de especies de sombra, y algunas de los tipos de vegetación natural que se identifican son: selva mediana o alta subperennifolia, bosque caducifolio (también conocido como bosque de niebla), selva alta perennifolia, selva baja caducifolia, encinares y bosque de pino-encino. En este cultivo predominan plantaciones muy viejas que pueden llegar hasta los 80 años y por lo general los cafetales no guardan una distribución o arreglo topológico. El manejo agronómico es reducido, no se realiza regulación de sombra, ni aplicación de agroquímicos, ocasionalmente se realiza la poda de cafetos. El sistema natural se ha conservado principalmente en áreas montañosas marginadas, con pendientes pronunciadas y en ocasiones en suelos muy pedregosos, dónde no es la única, ni la principal fuente de ingresos de sus productores.
- **Policultivo tradicional o “jardines de café”:** Similar al sistema natural, es un sistema agroforestal con sombra altamente diversificada. Se trata del estado más avanzado de manipulación del ecosistema forestal nativo. Se introduce el café debajo de los bosques o selvas originales y se acompaña al café con numerosas especies de plantas útiles y existe un sofisticado manejo de especies nativas e introducidas. En su mayoría se encuentran especies arbustivas y arbóreas, con propósitos bien definido, especies maderables, frutales, ornamentales, hortalizas, medicinales, entre otras. Por lo que es común que estos recursos también sean aprovechados por el productor, y en algunos casos, llegan a comercializar ciertos productos. Los componentes vegetales no tienen un arreglo o distribución homogénea en el cafetal, se carece de un ordenamiento espacial que responde a la estrategia, experiencia y criterios del productor. Las prácticas agrícolas fundamentales son: deshierbes, fertilización, poda y regulación de sombra. Este sistema es el de mayor importancia en la región de Cuetzalan, Puebla, así como también en la Sierra Negra.
- **Sistema de policultivo comercial:** Se presenta total remoción de los bosques y selvas originales con la introducción de un conjunto de árboles de sombra apropiados para el cultivo de café, que estén orientadas a la comercialización como una estrategia de diversificación productiva. En este sistema, se reduce la diversidad vegetal a un número de dos a cuatro especies por cafetal, ordenadas espacialmente con el propósito de un aprovechamiento intensivo del espacio para la obtención de varios productos destinados principalmente al mercado. El café se puede encontrar con especies frutales, para follaje, hortalizas, granos básicos, maderables, y plantas aromáticas o de especias. Sólo participan de dos a cuatro especies comerciales por predio y se

pueden encontrar otros componentes en la plantación, como árboles de Inga. En el sistema de policultivo es necesario disponer de una mayor variabilidad de instrumentos e insumos agrícolas. Este sistema sirve como estrategia para: proporcionar sombra al café, aprovechar la sombra, aprovechar espacios abiertos y períodos definidos, y hacer uso intensivo del terreno. Económicamente busca elevar la productividad de la tierra y de la mano de obra, eliminar la dependencia económica de un solo cultivo y distribuir el ingreso económico a través del año, entre otros beneficios. A diferencia del policultivo tradicional, la mayor parte de los productos obtenidos se destinan básicamente al mercado y sólo una pequeña porción la dejan para el consumo familiar.

- **Sistema de monocultivo bajo sombra o especializado:** Es una modalidad de monocultivo en la que se utilizan en forma casi única y dominante los árboles de una leguminosa, de esta forma se crea una plantación monoespecífica bajo un dosel igualmente especializado. En algunos casos puede emplearse sombra temporal y marginalmente algunos árboles de otras especies útiles. En su mayoría, las plantaciones especializadas tienen edades que no superan los 20 años, pero es posible encontrar cafetales de mayor edad. Este sistema tiene una productividad más alta que los sistemas natural y tradicional, desde ocho hasta más de 80 quintales por hectárea, en función de las regiones productoras y el uso de fertilizantes químicos. Este sistema presenta repercusiones como la disminución de la cantidad y calidad de prácticas culturales, reestructuración de la sombra, entre otros.
- **Café bajo sol o a cielo abierto:** Es la modalidad más intensiva que se practica en México, donde el café se cultiva sin ninguna cobertura de árboles y expuesto de manera directa al sol, esta modalidad representa un sistema totalmente agrícola que pierde el carácter agroforestal. Este sistema ha sido adoptado principalmente por grandes productores, con los objetivos de incrementar la producción y abatir los costos de producción por quintal. Ha sido muy controversial el efecto del sol sobre el cafeto, y las investigaciones muestran resultados contradictorios. Sin embargo, se concluye que el cultivo a sol proporciona condiciones diferentes a las del hábitat natural del cafeto, lo que incrementa el crecimiento y producción de las plantas como una respuesta estratégica de sobrevivencia de la especie, debido a que el metabolismo del cafeto se acelera y para sostener la producción, se necesita un alto costo energético y económico. Para que este cultivo sea exitoso, se necesita intensificar las prácticas de cultivo (la fertilización se hace indispensable, así como el control de malezas, la poda y la protección fitosanitaria), niveles muy altos en el uso de agroquímicos, densidades altas de cafetos y utilización de variedades mejoradas. En este sistema el estrato herbáceo es indeseable y se considera como maleza, se recomienda mantener el suelo limpio de hierbas.

2.8 CAFÉ EN EL ESTADO DE PUEBLA

A principios del siglo XX, la sierra norte del estado de Puebla experimentó cambios importantes en la consolidación del cultivo de café de la región y a partir de los años treinta, la producción del café se ha convertido en la actividad principal de los habitantes de la región, dentro de los cuales se encuentran productores pertenecientes a comunidades indígenas (Bernkopfová, 2014).

Durante el ciclo cafetalero 2021/22, el estado de Puebla se ubicó como productor en el tercer lugar a nivel nacional con un 17.4% de la producción total, presentando un incremento considerable en el rendimiento al pasar de 2.30 a 2.59 toneladas de café cereza por hectárea, es decir, un incremento anual de 12.6% (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2022). Actualmente en el estado de Puebla, el café es el tercer cultivo de mayor producción, después del maíz blanco y el frijol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017). En la zona de Cuetzalan del Progreso, se cultivan principalmente las variedades de Typica, Caturra, Mundo Novo, Bourbon (Figueroa-Hernández et al., 2015).

2.9 SALUD Y CALIDAD DEL SUELO

Comúnmente se utilizan los términos de “calidad del suelo” y “salud del suelo” como si fueran sinónimos y actualmente existe mucha discusión tratando de diferenciar estos términos. Entre estos intentos tenemos el presentado por Pankhurst et al., 1998, quien define “salud del suelo” como: La continua capacidad del suelo para funcionar como un sistema vivo vital, dentro de los límites del ecosistema y uso del suelo, para mantener la productividad biológica, promover la calidad del agua y aire, así como mantener la salud de las plantas, animales y seres humanos. Además, este término es referido por el autor como aquel que hace referencia a la idea del suelo como un organismo dinámico que funciona de manera holística, dependiendo de su condición o estado, en lugar de un objeto inanimado cuyos valores dependen de sus características innatas y el uso que se le da. Por otro lado, la calidad del suelo se define como la capacidad para desempeñar la función que se le asigne, en relación con sus características físicas, químicas y biológicas. En el caso de la agricultura, se hace énfasis en la capacidad del suelo para el desarrollo de los cultivos y su productividad (Pankhurst et al., 1998). En otras palabras, la salud del suelo hace referencia a las características fisicoquímicas y biológicas, necesarias a largo plazo para cumplir las funciones del suelo.

2.10 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL SUELO

Dentro de las variables propuestas para evaluar la salud del suelo, los indicadores físicos y químicos, como el pH, la densidad, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica son de vital importancia (Arias et al., 2005); sin embargo, los indicadores van a

cambiar en función del objetivo del estudio. Para el presenta trabajo se consideraron los siguientes:

- **Densidad aparente:** Es la relación entre el peso del suelo secado al horno y su volumen aparente, depende de las densidades de las partículas del suelo (arena, limo, arcilla), materia orgánica, y su disposición de empaquetamiento. Las capas de suelo compactadas tienen altas densidades aparentes, restringen el crecimiento de las raíces e inhiben el movimiento del aire y el agua a través del suelo(Arias et al., 2005).
- **pH:** Al estimar la actividad de los iones de hidrógeno en una solución de suelo, se puede medir la acidez o alcalinidad de un suelo. El pH afecta la solubilidad de los minerales del suelo, la disponibilidad de nutrientes de las plantas y la actividad de los microorganismos. La acidez generalmente está asociada con suelos lixiviados, mientras que la alcalinidad generalmente ocurre en regiones más secas (Arias et al., 2005).
- **Humedad:** Describe la cantidad de agua almacenada en el suelo en un momento y lugar determinado. El contenido fraccional de agua se expresa en términos de relaciones de masa o de volumen (Juárez-Sanz et al., 2006).
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica (CE) de una mezcla de suelo y agua es una indicación de la cantidad de iones (sales disueltas) presentes en la solución del suelo (Arias et al., 2005).
- **Contenido de materia orgánica:** Es la cantidad total de sustancias orgánicas presentes en el suelo, incluyendo los restos de tejidos vegetales y animales inalterados, sus productos de descomposición parcial, la biomasa microbiana, la fracción orgánica soluble en agua y el humus (Juárez-Sanz et al., 2006).
- **Nitrógeno total:** Junto con el carbono, el oxígeno y el hidrógeno, el nitrógeno es un elemento muy abundante en la materia viva y un importante componente de la materia orgánica del suelo(Juárez-Sanz et al., 2006).
- **Textura del suelo:** Las partículas del suelo, de forma individual, se agrupan en función de su tamaño. De acuerdo con dicho tamaño en los suelos se distinguen cuatro fracciones mayoritarias: grava, arena, limo y arcilla. La separación entre cada una de estas fracciones requiere del establecimiento de ciertos límites, los criterios empleados para establecer dichos límites son arbitrarios y dependen de los objetivos que se persigan, de ahí que se utilicen distintos valores (Juárez-Sanz et al., 2006).
- **Fósforo disponible:** En el suelo, el fósforo orgánico, procede fundamentalmente de plantas y microorganismos, junto con los excrementos de animales que son transformados en el suelo por la actividad microbiana (Juárez Sanz et al., 2006).
- **Capacidad de intercambio catiónico:** La capacidad del suelo para suministrar los principales nutrientes a las plantas, principalmente calcio, magnesio y potasio, se refleja en su capacidad de intercambio iónico. Específicamente, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) está, en gran medida, relacionada con la cantidad de coloides del suelo, materia orgánica y arcilla, que están cargadas negativamente y por lo tanto permiten que el suelo retenga cationes (Arias et al., 2005).

- Micronutrientes: Son los elementos que son esenciales para el desarrollo de la planta pero que se requieren sólo en cantidades usualmente menores a 50 mg kg^{-1} de tejido; tales como hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, cloro, boro, cobalto y níquel (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002).

2.11 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL SUELO

Un suelo sano, ayudará a mantener la diversidad de los organismos que lo habitan, y a su vez, estos organismos son necesarios para mantener las funciones del suelo: forman relaciones simbióticas con las raíces de las plantas, participan en el ciclo de los nutrientes y mejoran la estructura del suelo, con resultados positivos para la capacidad de retener agua y nutrientes, por mencionar algunas (Arias et al., 2005). En específico, los microorganismos, además de estas funciones, participan en los procesos de transformación de la materia orgánica y el ciclado de los nutrientes (Acuña et al., 2006). Por lo anterior, han cobrado importancia para determinar la fertilidad de un suelo y la sostenibilidad de ecosistemas y agroecosistemas, incluso el hombre ha utilizado bacterias y hongos que propician mejor crecimiento y desarrollo de las plantas. Con un adecuado manejo de los sistemas, es posible incrementar la actividad microbiana del suelo y así fortalecer la sostenibilidad de los ecosistemas y agroecosistemas (Ferrera-Cerrato & Alarcón, 2001).

Las bacterias tienen como función básica la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos. Mediante su metabolismo liberan al medio sustancias como enzimas, proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes que resultan beneficiosos para las plantas, relacionándose con un incremento en la cantidad de las raíces. El número de bacterias que se encuentren en el suelo se relaciona con algunas de las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, retención de humedad, estructura, micronutrientes y materia orgánica (Acuña et al., 2006).

Los hongos en el suelo son responsables principalmente de la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos recién incorporados al suelo. Mediante su metabolismo, liberan al medio enzimas que son capaces de destruir compuestos de estructuras complejas y también liberan proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes. Estos beneficios se relacionan con un incremento en la cantidad de raíces, una protección al ataque de fitopatógenos y un aporte importante de elementos básicos para el desarrollo y producción. La presencia de hongos en el suelo se ve relacionada con la disponibilidad de oxígeno en el medio y algunas propiedades fisicoquímicas del suelo, como la textura, porosidad, aireación, pH, materia orgánica y nutrientes (Acuña et al., 2006).

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 MUNICIPIO DE CUETZALAN DEL PROGRESO

El municipio de Cuetzalan del Progreso se encuentra en el estado de Puebla en la República Mexicana, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010, se ubica entre los paralelos 19° 57' y 20° 06' de latitud norte; los meridianos 97° 23' y 97° 35' de longitud oeste; altitud varía entre 180 y 1 600 msnm. Ocupa el 0.53% de la superficie del estado y cuenta con 177 localidades. Pertenece a la sierra madre oriental, al eje Neovolcánico y la llanura costera del golfo norte, por lo que presenta un clima semicálido húmedo con lluvias todo el año (99.12%) y cálido húmedo con lluvias todo el año (0.88%), con un rango de temperatura entre los 18°C y los 26°C. Posee una vegetación de bosque, pastizal y selva y del territorio total del municipio se destina un 64.21% a la agricultura y 2.08% a zona urbana (Figura 3). En su población se encuentran hablantes de lengua indígena, con los idiomas Chol, Huasteco, Mixteco, Zapoteco, Mazateco, Náhuatl, Otomí y Totonaco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

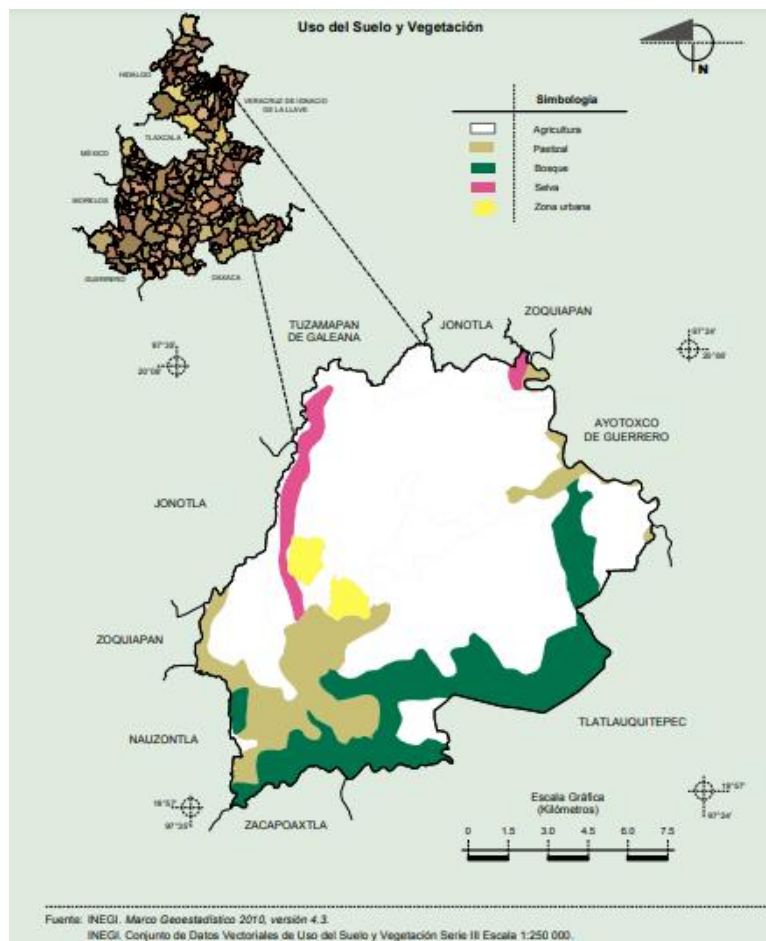


Figura 3. Uso de suelo y vegetación del municipio de Cuetzalan (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

3.2 COOPERATIVA TAPOSONTOK

La cooperativa Taposontok está formada por 68 productores, con parcelas ubicadas en las juntas auxiliares de San Andrés Tzicuilan, San Miguel Tzinacapan, Santiago Yancuictlalpan y Xiloxochico de Rafael Ávila Camacho pertenecientes al municipio de Cuetzalan del progreso, Puebla. En sus sistemas de producción presentan cultivos de café en alturas baja, media, y media alta, con parcelas antiguas, renovadas y mixtas (en transición de antiguas a renovadas). El suelo predominante en las parcelas de los productores de la cooperativa son acrisol y leptosol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).



Figura 4. Logo de la cooperativa Taposontok. (Goenaga, 2023)

A través del proyecto del Programa de Desarrollo Rural y Territorial (PRODETER) que tenía como objetivo implementar los cafetales a curva de nivel con terrazas individuales y sembrar variedades de café resistentes a la roya y los nemátodos.

Los productores comenzaron a trabajar de forma organizada a partir de su participación en el proyecto, al finalizar el proyecto, en el año 2020, decidieron conformar la cooperativa Taposontok. Los miembros pertenecen a familias que han producido café por varias generaciones, poseen una conciencia muy alta sobre el cuidado del medio ambiente, el suelo y los ecosistemas para las próximas generaciones y buscan producir café orgánico bajo los principios de la sustentabilidad (Goenaga, 2023).

CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA

Para determinar el nivel de sustentabilidad de los sistemas se utilizaron metodologías cuantitativas y cualitativas, así como experimentales. La metodología del trabajo de investigación constó de cuatro fases (Figura 5):



Figura 5. Etapas de la metodología. (Elaboración propia)

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la caracterización se recopiló información referente al tema de estudio y la zona de estudio (Municipio de Cuetzalan del Progreso, Puebla) mediante fuentes bibliográficas como artículos de investigación, tesis de grado e informes de gobierno. Esta información se complementó con las observaciones realizadas en las visitas de reconocimiento, además de la recabada en encuestas y entrevistas a los productores. Se compiló la información necesaria para clasificar las parcelas en los cinco métodos de cultivo de café e identificar las características del manejo agrícola.

4.3 MEDICIÓN Y MONITOREO DE LOS INDICADORES

En esta fase se realizaron salidas a campo para la toma de muestras y posterior análisis en el laboratorio. Los resultados obtenidos, permitieron identificar los puntos críticos de las diferentes formas de manejo de los sistemas cafetaleros. Se realizaron reuniones con los productores y directivos de la cooperativa para recopilar información sobre aspectos

productivos y socioeconómicos relacionados con el café. Los indicadores se enmarcan en el contexto social, ambiental y económico de la cooperativa.

Se seleccionaron 3 parcelas representativas a cada sistema de producción: rusticano o de montaña, policultivo tradicional, policultivo comercial, monocultivo bajo sombra y café bajo sol.

Se llevó a cabo la selección de los indicadores del sistema que inciden en la sustentabilidad de las diferentes formas de manejo, considerando los atributos para la sustentabilidad propuestos por la metodología MESMIS (productividad, estabilidad, resiliencia y confiabilidad, adaptabilidad, equidad y autogestión) y los criterios propuestos por Toledo & Moguel, 1999 para una producción de café sustentable (Salud agroecológica, biodiversidad, impacto edáfico e hidrológico, eficiencia económica, autosuficiencia productiva, autogestión, organización social y participación, identidad cultural y calidad de vida). Los indicadores seleccionados para su medición fueron los siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Indicadores y criterios de diagnóstico (Elaboración propia).

Atributo	Criterio de diagnóstico	Indicador estratégico	Dimensión	Criterios para una producción de café sustentable	
Productividad	Rendimiento	Producción	Económica	Eficiencia económica	
		Ingreso neto	Económica	Eficiencia económica	
		Edad de la planta	Económica	Eficiencia económica	
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Diversidad biológica	Variedades de café	Ambiental	Biodiversidad	
		Otras especies vegetales	Ambiental	Biodiversidad	
	Diversidad económica	Policultivo	Económica	Autosuficiencia productiva	
	Vulnerabilidad biológica	Incidencia de plagas y enfermedades	Ambiental	Salud agroecológica	
		Índice de biodiversidad (Población microbiana)	Ambiental	Salud agroecológica	
		Nutrición del cafeto	Ambiental	Salud agroecológica	
	Conservación de recursos	Uso de métodos de conservación del suelo	Ambiental	Salud agroecológica/impacto edáfico e hidrológico	
		Salud del suelo	Ambiental	Salud agroecológica/impacto edáfico e hidrológico	
		Uso de fertilizantes y plaguicidas (Tipo de fertilizante y plaguicidas)	Ambiental	Salud agroecológica	
	Calidad de vida	Escolaridad	Social	Calidad de vida (bienestar)	
		Acceso a servicios básicos (agua potable, electricidad, servicios sanitarios, salud, educación)	Social	Calidad de vida (bienestar)	
	Vulnerabilidad social	Permanencia de los productores en el sistema (Tiempo produciendo café)	Económica	Autosuficiencia productiva	
	Vulnerabilidad Económica	Ingresos externos	Económica	Eficiencia económica	
	Adaptabilidad	Fortalecimiento del proceso de aprendizaje	Capacitación	Social	Identidad cultural
		Capacidad de cambio	Superficie por sistema	Económica	Eficiencia económica
Equidad	Distribución de costos y beneficios	Participación de mujeres en el proceso de producción	Social	Organización Social y Participación	
Autodependencia (autogestión)	Participación y organización	Participación en toma de decisiones	Social	Organización Social y Participación	
	Control	Derechos de propiedad	Económica	Autogestión	

4.3.1 TOMA DE MUESTRAS

Durante el mes de febrero del año 2023 se realizó la toma de muestras en 27 parcelas de los productores de la cooperativa (Figura 6). Se tomaron muestras de suelo y hoja de cada parcela para su posterior análisis de laboratorio (Figura 7 y 8). Las hojas se seleccionaron con base en los criterios de ausencia de plagas, deficiencia de nutrientes o enfermedades, de acuerdo con la metodología propuesta por Sadeghian Khalajabadi & Salamanca Jiménez, 2015. Para la determinación de la masa microbiana las muestras se tomaron cercanas a la raíz y fueron almacenadas en recipientes de plástico estériles, los cuales fueron refrigerados para su posterior análisis. Las muestras de suelo para la determinación de los parámetros físicos y químicos fueron compuestas a una profundidad de 30 cm en cada parcela y se rotularon hasta su posterior análisis.

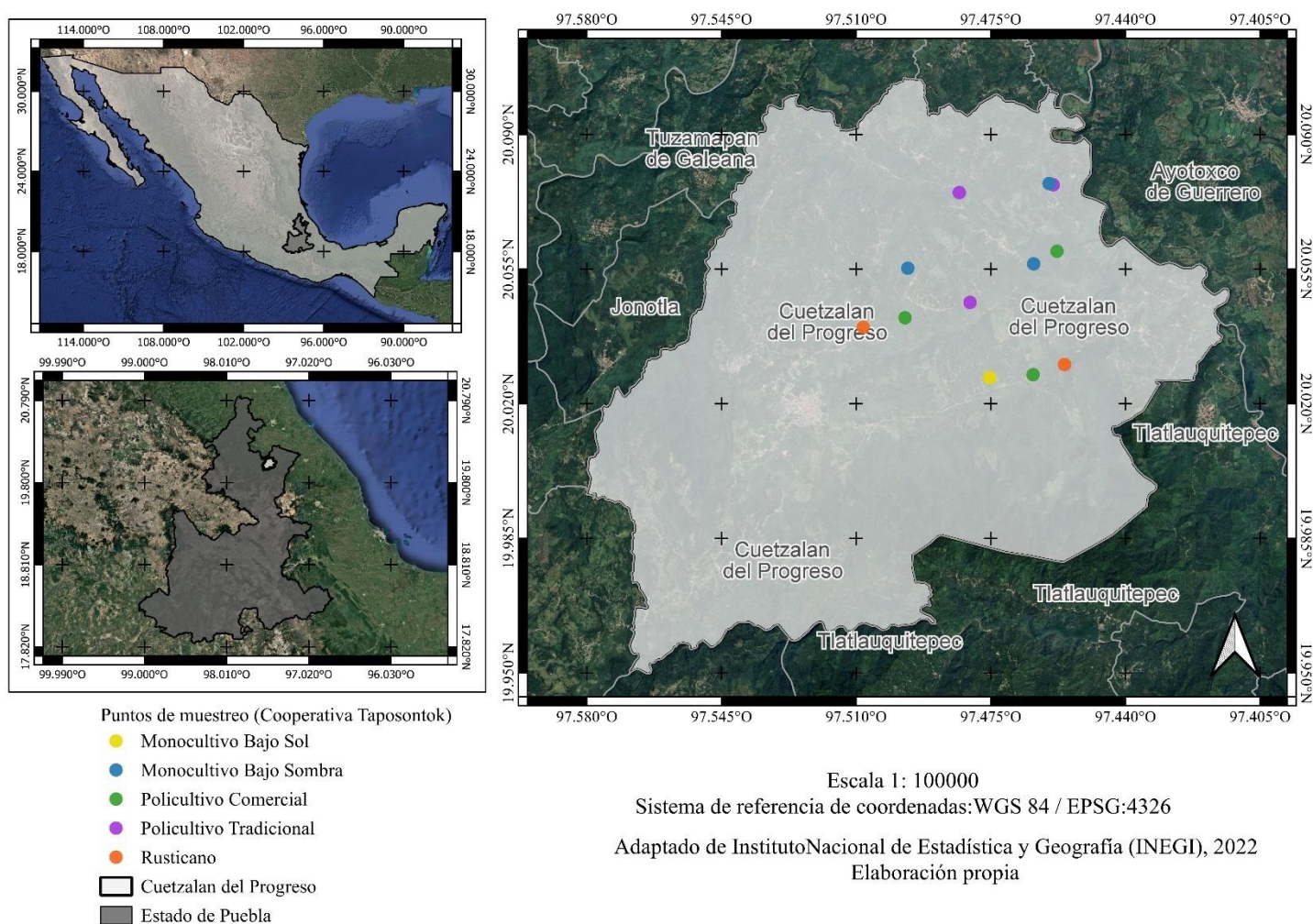


Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo (Elaboración propia)



Figura 7. Muestreo de suelo



Figura 8. Muestreo de hoja

Se recabó información de las características de los sistemas de producción para su posterior clasificación con apoyo de la tabla del Anexo 1, correspondiente a las variedades de café, especies vegetales manejadas, presencia de humedad y materia orgánica en el suelo, presencia de plagas y enfermedades, uso de fertilizantes y pesticidas, etc.

4.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS

Se clasificaron los sistemas de producción de la cooperativa con base en los métodos de producción de café de Toledo & Moguel, 1996. Se seleccionaron 3 sistemas de producción por cada método y la caracterización en función de los criterios que se muestran en la tabla 2.

La extensión de las parcelas de Monocultivo Bajo Sol (Figura 9) es de 0.25 a 7 ha, cultivan las variedades de café Sarchimor, Geisha, Marsellesa y Arábica, con plantas de 1 a 4 años, al encontrarse en renovación de cultivo. No tiene presencia de sombra y otras de las especies que se cultivan son Chalahuite, Ixpepe, Carboncillo, Cedro, Pimienta, Maíz, Lima, Plátano, Zapote y Mamey. No realizan poda de café ni aplican rotación de cultivo. Los cafetos sufren algunas plagas y/o enfermedades como roya, broca y ojo de gallo, para las cuales aplican un tratamiento químico, además de aplicar fertilizante 2 veces al año.

Las parcelas de Policultivo Comercial (Figura 10) tienen una extensión de 0.25 a 2 ha, se cultiva una variedad de café por parcela, que puede ser Sarchimor, Oro Azteca y Marsellesa.

Se encuentran en proceso de renovación del cultivo por lo que las plantas de café tienen una edad de 1.5 a 18 años. Este sistema cuenta con otras especies vegetales para sombra, las cuales se comercializan, entre estas se encuentran: frijol de árbol, caoba, carboncillo, pino, helechos, chalahuite, pimienta, cedro, naranja y limón. Se realiza la poda del café y los árboles de sombra, y no se ha realizado la rotación de cultivo. Las parcelas sufren de plagas y/o enfermedades como la roya y ojo de gallo, y se aplica tratamiento químico para combatirlas.

El sistema de Monocultivo Bajo Sombra (Figura 11) tiene parcelas con una extensión de 0.25 ha y cultivan las variedades Oro Azteca, Caturra y Criollo. No se encuentran en proceso de renovación de cultivo y la edad del cafeto es de 14 a 15 años. Algunas especies de sombra utilizadas son chalahuite, naranja, mandarina y pimienta. Se realiza poda al cafeto, pero no a los árboles de sombra y no existe rotación de cultivo. Algunas de las plagas y/o enfermedades presentes son roya y ojo de gallo, para los cuales no se aplica tratamiento.

Las parcelas del sistema Rusticano (Figura 12) tienen una extensión de 0.25 a 1 ha, cultivando las variedades Criollo y Marsellesa, con plantas que van de 1.5 a 40 años, debido al proceso de renovación del cultivo. Tiene presencia de especies vegetales de sombra, entre las que se encuentran encino, bambú, helechos, arborescentes, orquídeas, plátano, chalahuite y mamey, además de otras especies del estrato original que no se encuentran identificadas. Se realiza la poda del café, pero no de las especies de sombra y la principal plaga del cafeto es la roya, no se utiliza ningún tratamiento.

El sistema de Policultivo Tradicional (Figura 13) tiene parcelas con una extensión de 0.25 a 1 ha, cultivando las variedades Bourbon, Mundo Novo y Marsellesa, y al encontrarse en un proceso de renovación, las plantas tienen una edad de 3 a 30 años. Hay presencia de sombra, encontrándose especies vegetales como naranja, chalahuite, carboncillo, limón, pimienta, paha, zapote negro, plátano y platanillo. Se realiza poda del cafeto y de los árboles de sombra, pero no se aplica rotación de cultivo. Las plantas sufren de roya, broca y ojo de gallo, para las cuales aplican tratamiento físico (o trampas) únicamente para la broca.

Tabla 2. Características de los sistemas de producción de café (Elaboración propia).

Tipo de manejo	Monocultivo bajo sol	Policultivo tradicional	Policultivo Comercial	Monocultivo bajo sombra	Rusticano
Extensión del terreno	0.25-7 ha	0.25 y 1 ha	0.25, 0.75 y 2 ha	0.25 ha	0.25 y 1 ha
Varietades de café	Sarchimor, Geisha, Marsellesa y Arábica	Bourbon, Mundo Novo y Marsellesa	Sarchimor, Oro Azteca y Marsellesa (Uno por sistema)	Oro Azteca, Caturra, Criollo	Criollo, Marsellesa
Edad de las plantas	1-4 años	3-30 años	1.5 - 18 años	14-15 años	1.5- 40 años
Renovación de cultivo	En transición	En transición	En transición	No	En transición
Presencia de sombra	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Otras especies (Nombre común)	Chalahuite, Ixpepe, Carboncillo, Cedro, Pimienta, Maíz, Lima, Plátano, Zapote y Mamey	Naranja, Chalahuite, Carboncillo, Limón, Pimienta, Pahua, Zapote Negro, Plátano, Platanillo	Frijol de árbol, Caoba, Carboncillo, Pino, Helechos, Chalahuite, Pimienta, Cedro, Naranja, Limón	Chalauite, Naranja, Mandarina, Pimienta	Encino, Bambú, Helechos, arborescentes, Orquídeas, Plátano, Chalahuite, Mamey (Sin identificar del estrato original)
Materia orgánica	Abundante	Abundante	Abundante	Abundante	Abundante
Humedad	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Poda café	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Poda sombra	No	Sí	Sí	No	No
Rotación de cultivo	No	No	No	No	No
Fertilización	Sí	Sí	Sí	Sí (uno no aplica)	Sí
Frecuencia de fertilización	2 veces al año	2-3 veces al año	3 veces al año	3 veces al año	4 veces al año
Plagas/enfermedades	Roya, broca y ojo de gallo	Roya, broca y ojo de gallo	Roya, ojo de gallo	Roya, ojo de gallo	Roya
Tratamiento	Químico	Físico (broca)	Químico	No	No



Figura 9. Monocultivo bajo sol.



Figura 10. Policultivo comercial



Figura 11. Monocultivo bajo sombra



Figura 12. Rusticano



Figura 13. Policultivo tradicional

Se identificó que el 80% de los productores son a pequeña escala, es decir, poseen parcelas con una extensión menor a 2 hectáreas. Todos los métodos de cultivo de café poseen otras especies vegetales, con fines de sombra para el cafeto o productivas, y en todos los sistemas dónde se tomaron muestras se pudo observar una alta cantidad de humedad y materia orgánica en el suelo (figura 14): hojarasca, hongos, restos vegetales y animales. Además, el 80% de los productores utilizan fertilizante en el suelo y todos los sistemas de producción presentan plagas o enfermedades, principalmente roya (figura 15), de los cuales, únicamente el 22% utilizan un tratamiento para las plagas.



Figura 14. Humedad y materia orgánica en el suelo.



15. Presencia de enfermedades en el cafeto (roya).

4.4 ANÁLISIS DE LA SALUD DEL SUELO Y DE LA PLANTA

Para los indicadores ambientales de suelo se midieron los parámetros según los métodos normados en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que Establece Las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis., 2002:

- Densidad aparente
- pH
- Humedad
- Conductividad eléctrica
- Contenido de materia orgánica
- Carbono orgánico
- Nitrógeno total
- Textura del suelo
- Fósforo disponible
- Capacidad de intercambio catiónico (Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K))
- Micronutrientes (Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Hierro (Fe))

En el cultivo de café se cuantificaron en suelo y planta los siguientes nutrientes: Nitrógeno (N), fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Hierro (Fe).

Para los grupos microbianos se realizó la determinación de las Unidades formadoras de colonias (UFC) de actinomicetos, bacterias y hongos totales por dilución en placa. Para los actinomicetos y hongos se utilizó el medio mineral enriquecido con malta, y caldo nutritivo para las bacterias totales (bacterias heterotróficas-mesofílicas) (Grisell Mora-Ravelo et al., 2013)..

El nitrógeno (N) presenta un papel fundamental en el cultivo del café por la alta demanda de fertilización nitrogenada; sin embargo, las asociaciones establecidas en la zona de la raíz y el suelo (rizósfera) determinan la disponibilidad de los nutrientes para su desarrollo. Por lo que se cuantificó la dinámica de las poblaciones bacterianas rizosféricas nitrificantes y desnitrificantes mediante la técnica del número más probable (NMP). Las fuentes de N que se utilizaron fueron $(\text{CaCO}_3) \text{NH}_4$ para Nitrosomonas y $(\text{CaCO}_3) \text{NO}_2$ para Nitrobacter. La fuente de N para desnitrificantes fue sulfato de amonio. Se incubaron a 28°C durante 7 y 21 días, pasado este tiempo se determinó la concentración de $\text{NO}_2\text{-N}$ por el método de la Sulfanilamida y la concentración del $\text{NO}_3\text{-N}$ por el método del salicilato de sodio (Grisell Mora-Ravelo et al., 2013).

4.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Posterior al muestreo, se trasladaron las muestras al área de secado del Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas (CICA) donde las muestras de hoja se secaron dentro de bolsas de papel. Las muestras de suelo para los análisis fisicoquímicos se extendieron sobre una lámina de papel y se dejaron secar al aire (Figura 16), una vez completamente secas, se tamizaron con un tamiz de 2 mm de luz de malla y se estimó el porcentaje de fragmentos gruesos (Tabla 3). Las muestras de suelo secas y tamizadas (la fracción de fragmentos finos) se almacenaron para su posterior análisis.



Figura 16. Secado de muestras

Tabla 3. Valores de fragmentos gruesos (Elaboración propia).

Método de cultivo	% Fragmentos gruesos	% Fragmentos finos
Monocultivo bajo sol	69.80	30.19
Policultivo tradicional	65.95	34.04
Policultivo comercial	58.72	41.28
Monocultivo bajo sombra	81.47	18.53
Rusticano	77.66	22.33

4.6 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

La determinación de la población microbiana se realizó en el Laboratorio 204 Hongos Comestibles y Patología Vegetal del Centro de Agroecología (CENAGRO), ubicado en el Ecocampus Valsequillo BUAP.

Bacterias totales

Para la determinación de las UFC de bacterias se utilizó la técnica del número más probable. Se preparó caldo nutritivo como medio de cultivo (para las bacterias heterotróficas y mesofílicas), las muestras se diluyeron por triplicado de 1 g de suelo en 9 ml de agua, se agitaron y se hicieron las diluciones agregando 1 ml de la primera solución en 9 ml de agua y así sucesivamente hasta 10^{-7} . Posteriormente se sembraron las diluciones -5, -6 y -7 en las microplacas, agregando 200 μ l de muestra en 1800 μ l de medio. Se dejaron incubar por 48h y se hizo el conteo de las muestras positivas (Figura 17).

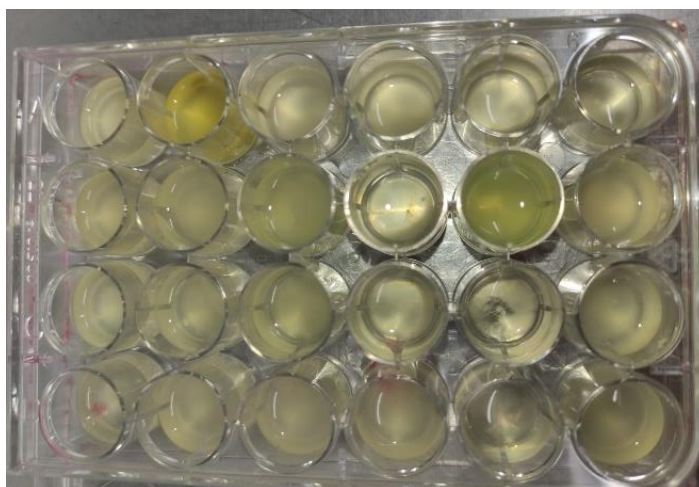


Figura 17. Crecimiento de bacterias

Hongos y actinomicetos

Para la determinación de las UFC de hongos y actinomicetos se utilizó el medio mineral de malta, se diluyeron las muestras por triplicado, usando 1 g de suelo en 9 ml de agua, se agitaron y se agregó 1 ml de la primera dilución en 9 ml de agua y así sucesivamente hasta 10^{-4} . Posteriormente, se sembraron en extendido en placa en caja Petri las diluciones -3 y -4, agregando 100 μ l de muestra en la caja Petri. Se dejaron incubar de 5 a 6 días y se contaron los hongos y actinomicetos presentes (Figura 18).











Manejo	Hongos	Actinomicetos
Monocultivo bajo sol		
Policultivo tradicional		
Policultivo comercial		
Monocultivo bajo sombra		
Rusticano		

Figura 18. Diversidad morfológica de hongos y actinomicetos de los diferentes manejos de cultivo de café (Elaboración propia).

Bacterias nitrificantes

Las bacterias nitrificantes pertenecientes a los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* se cultivaron en el medio “*Nitrosomonas*” en tubos de ensayo. Se partió de 1 gramo de la muestra y se hicieron diluciones hasta la concentración 10^{-7} (figura 19), se incubaron (Figura 20) y monitorearon por 8 días, considerando la turbidez como crecimiento positivo. Se utilizó el método de la Sulfanilamida para determinar $\text{NO}_2\text{-N}$ y el método del salicilato de sodio para determinar el $\text{NO}_3\text{-N}$ como resultado de la actividad de las bacterias nitrificantes.



Figura 19. Inoculación del medio de cultivo



Figura 20. Incubación

Bacterias desnitrificantes

Se utilizó el medio “Nitrate reduction Broth, Clark” para determinar y diferenciar las bacterias Gramnegativas, basándose en su habilidad para reducir nitratos a nitritos o formar N_2 gaseoso. Se colocaron 9ml del medio en tubos de ensayo con tapa y se introdujo una campana de Durham. Se pesó 1 gramo de la muestra y se hicieron diluciones hasta la concentración 10^{-4} . Se incubaron y monitorearon de 48 horas a 5 días, considerando la presencia de una burbuja dentro de la campana como crecimiento positivo (Figura 21). Posteriormente se utilizó el método del salicilato de sodio para determinar la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$.

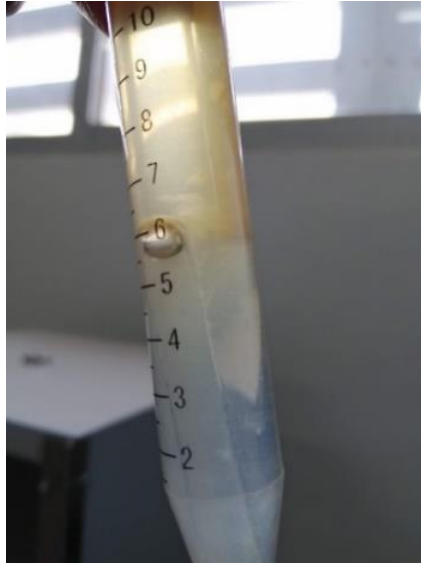


Figura 21. Presencia de burbuja en campana Durham (crecimiento positivo)

4.7 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO

Se determinaron por triplicado en suelo los siguientes parámetros, de acuerdo con los métodos establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que Establece Las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis., 2002:

- **Humedad:** La humedad se determinó mediante el método gravimétrico, determinando por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco (aquel secado a la estufa a 105°C hasta obtener un peso constante).
- **Densidad aparente:** Se utilizó el método de la probeta para la determinación de la densidad aparente de los suelos. La densidad aparente de una muestra de suelo es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso (Figura 22).



Figura 22. Determinación de densidad aparente

- **pH:** Para la determinación del pH se utilizó el método electrométrico en muestras de suelo en una solución de agua pura, midiendo potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2.
- **Conductividad eléctrica:** Se realizó la medición en el extracto de saturación con un conductímetro (Figura 23).



Figura 23. Determinación de pH y conductividad en solución

- **Materia orgánica:** Se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black, basándose en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (Figura 24).



Figura 24. Cuantificación de materia orgánica

- **Nitrógeno total:** Se determinó el nitrógeno total utilizando el método Kjeldahl, siguiendo los pasos de digestión (para convertir el nitrógeno a NH_4), destilación y cuantificación, mediante la titulación del producto resultado de la destilación (Figura 25).

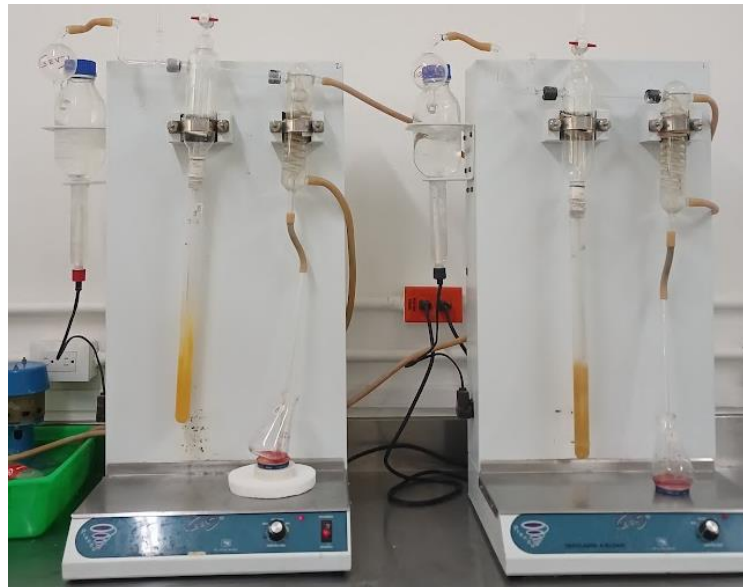


Figura 25. Destilación por el método Kjeldahl

- **Textura del suelo:** Mediante el procedimiento de Bouyoucos (Figura 26), se determinó la textura del suelo en disolución tomando las lecturas con hidrómetro a los 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena).



Figura 26. Determinación de textura.

- **Fósforo disponible:** Se utilizó el procedimiento de Bray y Kurtz (Figura 27), donde la solución extractora de P consiste en una combinación de HCl y NH_4F la cual remueve formas de P ácido-solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH_4F disuelve los fosfatos de aluminio y de hierro al formar un ion complejo con estos iones metálicos en solución ácida.

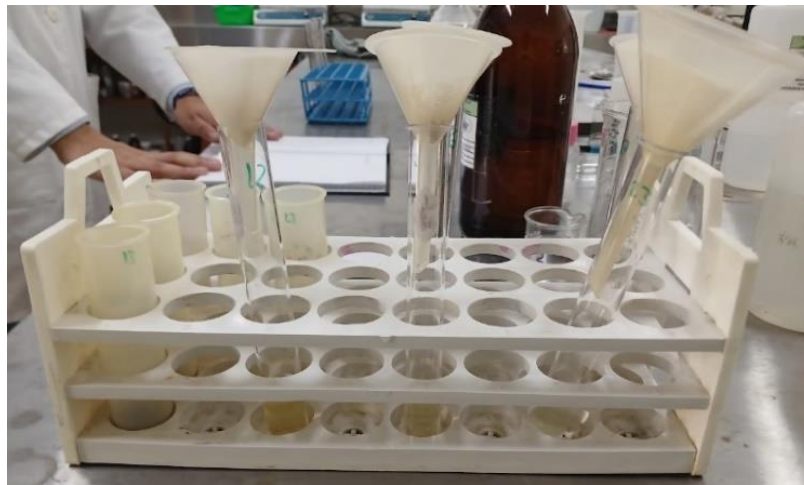


Figura 27. Preparación del extracto para la determinación de fósforo

- **Capacidad de intercambio catiónico (Ca, Mg, Na, K):** Empleando acetato de amonio 1N como solución saturante, para posteriormente obtener los extractos (A) y (B). El extracto A fue utilizado para determinar las bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) mediante espectrofotometría de absorción atómica (Figura 28), mientras que el extracto B fue utilizado para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico total, mediante el método Kjeldahl.



Figura 28. Determinación de bases intercambiables con espectrofotometro de absorción atómica

- **Micronutrientes (Zn, Mn, Cu, Fe):** Se utilizó DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaacético) para obtener el extracto (Figura 29), y posteriormente cuantificar los elementos mediante espectrofotometría de absorción atómica (Figura 30).



Figura 29. Preparación del extracto para determinación de micronutrientes

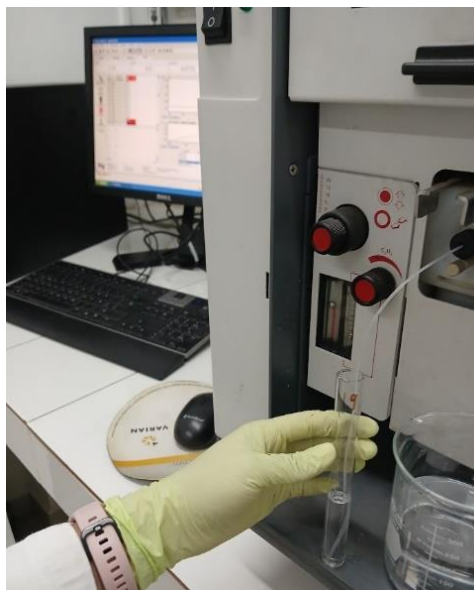


Figura 30. Determinación de micronutrientes mediante espectrofotometría de absorción atómica

4.8 ANÁLISIS FOLIAR

Una vez que las muestras de hoja se secaron al aire, se secaron en estufa a 70°C por 24 horas, posteriormente se trituraron y tamizaron en malla del No. 20 (Figura 31, 32). De la muestra, se tomaron 0.6 g y se realizó una digestión con 10 ml de peróxido de hidrógeno (30% w/w) y 10 ml de HNO₃ concentrado (Figura 33), finalmente se filtró el producto y se aforó la solución a 50 ml con agua destilada. Se determinaron Ca, Mg, Na, K, Zn, Mn, Cu, Fe mediante espectrofotometría de absorción atómica (Figura 34), Nitrógeno total por el método Kjeldahl y P extraíble por el método de Bray y Kurtz.



Figura 31. Secado de las muestras de las hojas

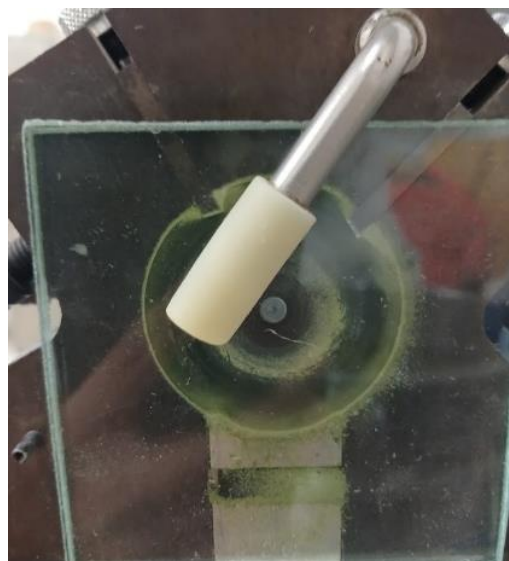


Figura 32. Trituración de la muestra seca



Figura 33. Digestión de la muestra



Figura 34. Análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica

4.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para comparar las poblaciones microbianas, los parámetros físicos y químicos del suelo, así como los nutrientes en la hoja del café de los diferentes manejos se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($p < 0.05$) utilizando el software estadístico RStudio, con los paquetes "stats" y "multcomp" en R. Posteriormente se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar las relaciones e impacto de las propiedades analizadas sobre la salud del suelo en los cafetales de los diferentes métodos de cultivo.

4.9 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

Se realizaron entrevistas para obtener información correspondiente a la producción, acceso a servicios básicos, ingresos, demanda y desplazamiento de trabajo, capacidad de ahorro, acceso a créditos, capacitación de los productores, uso de conocimientos y habilidades locales, generación de conocimientos, presencia de pueblos originarios, nivel de autofinanciamiento y proceso de toma de decisiones (Figura 35). Estas entrevistas se aplicaron durante las reuniones mensuales que realiza la cooperativa con sus integrantes, además del representante de la cooperativa y el ingeniero que les brinda asesoramiento técnico. La entrevista para el representante y el asesor técnico constaban de 15 preguntas abiertas, y para los productores 59, las cuales se dividieron en cinco secciones: de los productores, producción y venta de café, uso de agroquímicos, inversión y costos de producción e ingresos extra.



Figura 35. Aplicación de entrevistas a miembros de la cooperativa Taposontok.

4.10 ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó la evaluación de la sustentabilidad de acuerdo con el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS). Se compararon los datos obtenidos durante el trabajo de investigación como aquellos considerados como valores óptimos por la literatura (antecedentes de otros trabajos de investigación, bases de datos, etc.) o los valores máximos obtenidos en los sistemas de estudio. Los resultados obtenidos se integraron en un diagrama tipo AMIBA que permitió comparar simultáneamente el nivel de sustentabilidad de cada sistema de producción analizado.

Se tomaron en cuenta las consideraciones por Pérez-Grovas Garza, 2000, donde se considera que, si un indicador se encuentra por debajo del 50%, es necesario tomar algunas medidas correctivas. Si el indicador está entre el 50% y 75%, implica que el sistema podría entrar en una crisis a corto plazo, por lo que será necesario tomar medidas preventivas para evitar su inviabilidad. Por último, si está por encima del 75%, el sistema no presenta problemas con este indicador, aunque puede mejorarse con el tiempo hasta llegar al nivel óptimo.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1 PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS

De los métodos de cultivo de café analizados, el que tuvo mayor población de bacterias totales por gramo de muestra fue el método rusticano, y el de menor población fue el monocultivo bajo sol. Los datos obtenidos para bacterias totales indicaron que se presentan diferencias estadísticamente significativas entre todos los métodos de cultivo ($p= 2 \times 10^{-16}$). Los datos obtenidos de UFC de hongos muestran diferencias estadísticamente significativas entre todos los métodos de cultivo ($p= 3.35 \times 10^{-10}$), únicamente monocultivo bajo sol y monocultivo bajo sombra son similares estadísticamente (Gráfico 1).

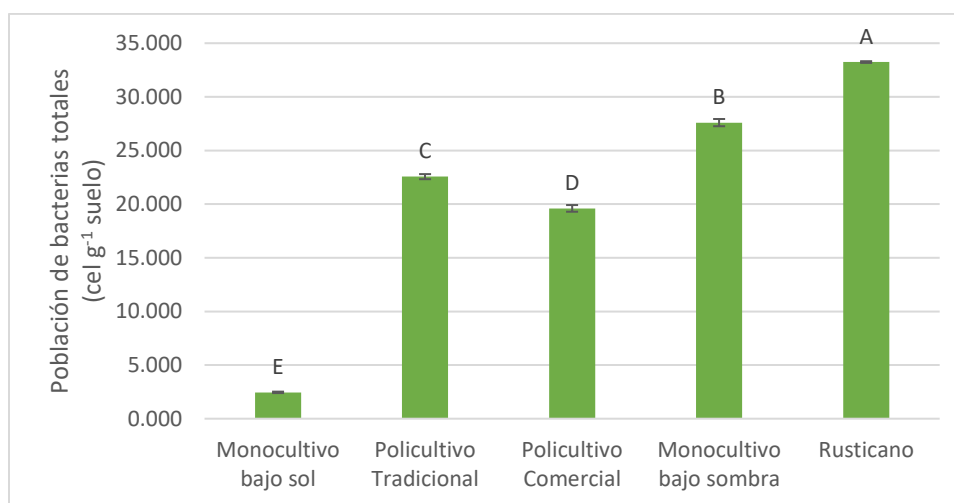


Gráfico 1. Población de bacterias totales de los sistemas de producción de café. Cada valor representa el promedio de los triplicados de cada manejo. *Las letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en los manejos ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Para el caso de hongos y actinomicetos, el método con menor población fue policultivo comercial, y el de mayor cantidad fue rusticano (gráficos 2 y 3).

Los datos obtenidos para UFC de actinomicetos confirmaron diferencias significativas entre sí ($p = 9.56 \times 10^{-8}$): El método de manejo Rusticano mostró diferencia estadísticamente significativa en comparación con los otros grupos, al igual que el policultivo comercial, mientras que los manejos de Monocultivo bajo sombra, Policultivo tradicional y monocultivo bajo sol son estadísticamente similares.

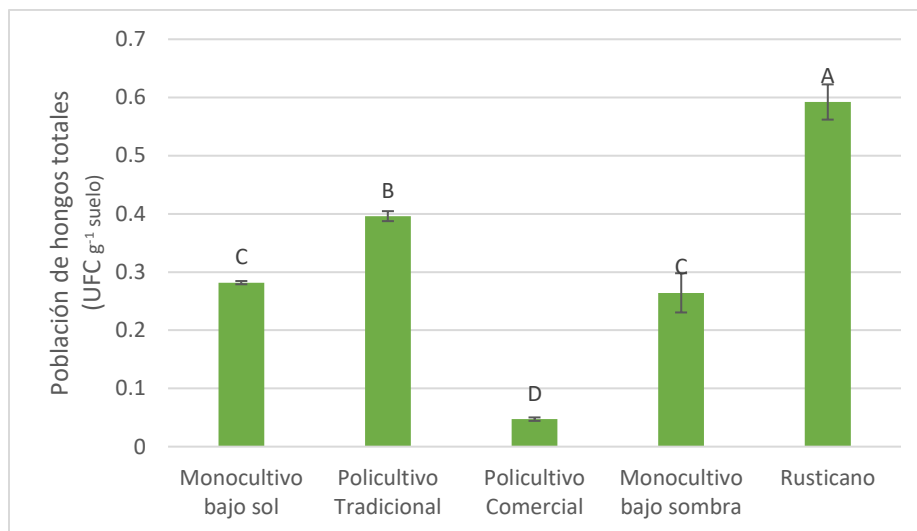


Gráfico 2. Población de hongos totales de los sistemas de producción de café. Cada valor representa el promedio de los triplicados de cada manejo. *=Las letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en los manejos ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

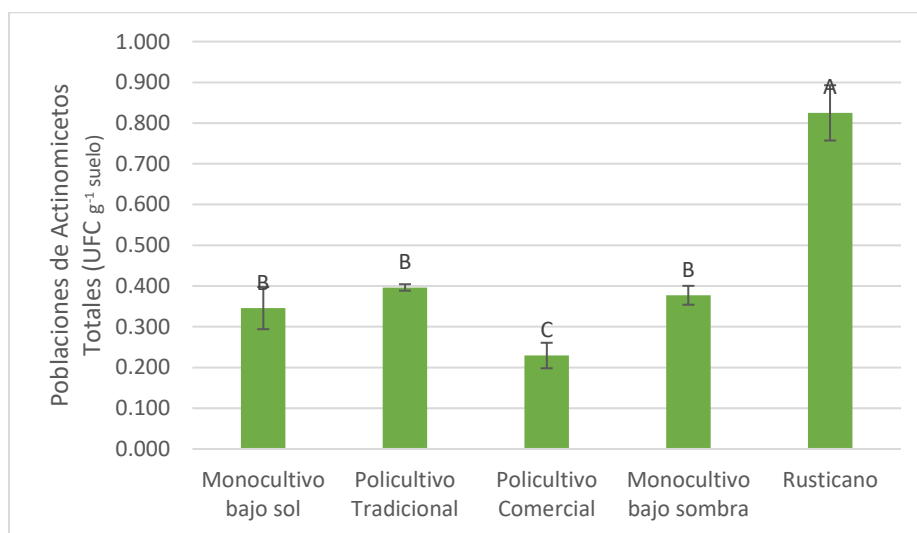


Gráfico 3. Población de actinomycetos totales de los sistemas de producción de café. Cada valor representa el promedio de los triplicados de cada manejo. *=Las letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en los manejos ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Para las poblaciones de las bacterias nitrificantes (Gráfico 4) se identificaron diferencias significativas entre todos los métodos de manejo ($p= 1.82 \times 10^{-8}$), siguiendo la tasa de nitrificación ($p= 4.74 \times 10^{-11}$) un comportamiento similar, únicamente el sistema rusticano y monocultivo bajo sombra presentaron similitud. Monocultivo bajo sol presentó mayor población de bacterias nitrificantes y una mayor tasa de nitrificación, mientras que rusticano presentó los valores más bajos de población y tasa de nitrificación.

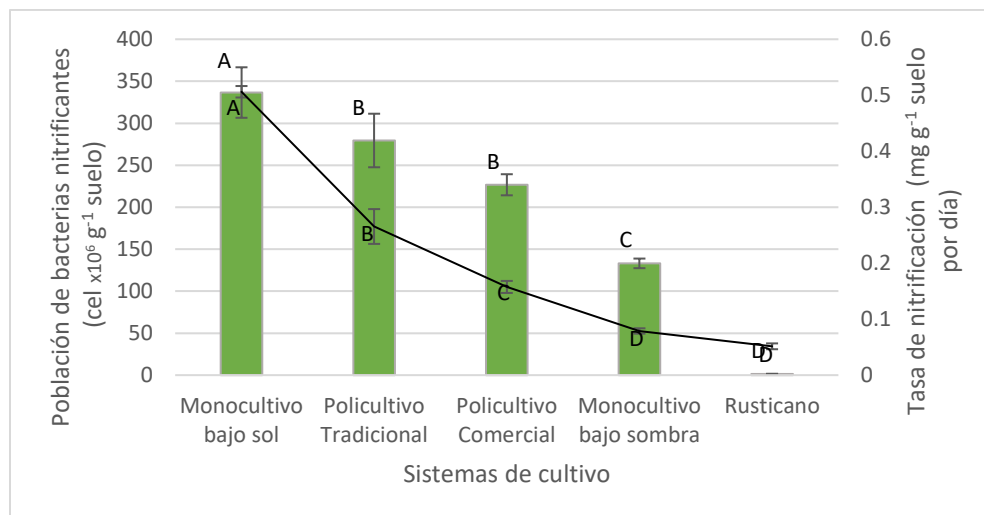


Gráfico 4. Población de bacterias nitrificantes y tasas de nitrificación de los sistemas de producción de café. Cada valor representa el promedio de los triplicados de cada manejo. *=Las letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en los manejos ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Las poblaciones de bacterias desnitrificantes (Gráfico 5) de monocultivo bajo sol y rusticano mostraron diferencias entre sí, y con el resto de los métodos de cultivo; los métodos policultivo comercial, policultivo tradicional y monocultivo bajo sombra fueron similares ($p=9.99 \times 10^{-8}$), presentando el sistema de monocultivo bajo sol una población mayor que el resto de los sistemas. La tasa de desnitrificación fue diferente para todos los métodos de cultivo ($p=1.52 \times 10^{-14}$), con monocultivo bajo sol teniendo la mayor tasa que el resto de los sistemas.

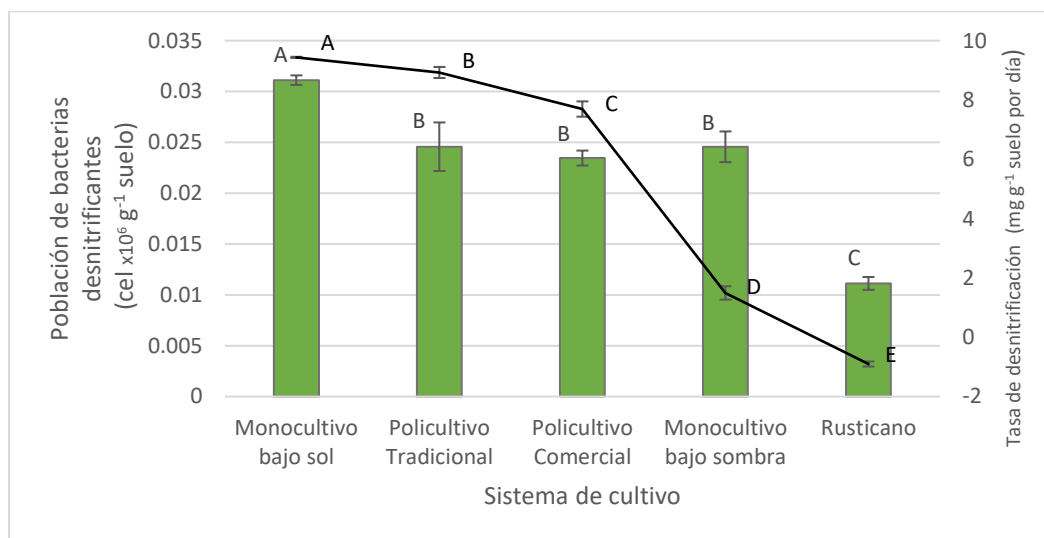


Gráfico 5. Población de bacterias desnitrificantes y sus tasas de desnitrificación de los sistemas de producción de café. Cada valor representa el promedio de los triplicados de cada manejo. *=Las letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en los manejos ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

5.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Los valores obtenidos para las propiedades fisicoquímicas del suelo (Tabla 4) se puede observar que las clases texturales presentes son arcilla, limo arcilloso, franco, franco arcilloso franco arcillo arenoso. Los valores de pH de todas las muestras de suelo oscilan entre 3.9 y 4.93, por lo que se clasifican como fuertemente ácidos (Diario Oficial de la Federación, 2002) y la densidad aparente varía entre 0.81 y 0.91 g cm⁻³. Presentaron porcentaje de humedad de 40.27 a 66.36% y C.E. entre un rango de 0.13 a 0.28 dS.

Para los macronutrientes, el monocultivo bajo sombra tuvo el mayor porcentaje de N_t (0.47 %, $p = 0.001$) y M.O. (10.89 %, $p = 0.001$); sin embargo, para K el sistema Rusticano tuvo el valor más alto (0.76 Cmol Kg⁻¹, $p = 0.001$). Por otro lado, el P fue alto en monocultivo bajo sol (7.96 mg Kg⁻¹, $p = 0.001$). En cuanto a los micronutrientes, el sistema rusticano presentó la concentración significativamente menor ($p = 0.001$) de Cu (1.05 mg Kg⁻¹), Zn (0.50 mg Kg⁻¹) y Mn (0.86 mg Kg⁻¹); y una mayor concentración de Na (1.14 Cmol Kg⁻¹). El policultivo tradicional tuvo los valores significativamente más altos ($p = 0.001$) de Mg (4.26 Cmol Kg⁻¹), Zn (2.88 mg Kg⁻¹), Mn (8.96 mg Kg⁻¹) y Cu (3.45 mg Kg⁻¹).

El monocultivo bajo sombra presentó la mayor CIC (18.40 Cmol Kg⁻¹, $p = 0.001$) y Ca (6.83 Cmol Kg⁻¹, $p = 0.001$). Para Fe el sistema de monocultivo bajo sol tuvo la concentración más alta (140.45 mg Kg⁻¹), y valores significativamente más bajos ($p = 0.001$) para Ca (1.93 Cmol Kg⁻¹), Mg (1.13 Cmol Kg⁻¹) y CIC (7.88 Cmol Kg⁻¹). En Policultivo comercial se encontraron los valores significativamente más bajos ($p = 0.001$) de Fe (11.46 mg Kg⁻¹), M.O. (4.79 %), K (0.33 Cmol Kg⁻¹) y Na (0.88 Cmol Kg⁻¹).

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del suelo por método de manejo (Elaboración propia).

Propiedad	Monocultivo Bajo sol		Policultivo tradicional		Policultivo comercial		Monocultivo bajo sombra		Rusticano		p	
Textura	Arcilla y Limo Arcilloso		Franco arcilloso y Arcilla		Franco arcilloso, Franco y Arcilla		Franco y Arcilla		Franco Arcillo Arenoso y Franco Arcilloso		-	
pH	3.90 ± 0.49		4.93 ± 0.55		4.58 ± 0.24		4.78 ± 0.52		4.63 ± 0.38		0.128	
Densidad Aparente (g cm⁻³)	0.85 ± 0.01		0.91 ± 0.05		0.88 ± 0.09		0.81 ± 0.07		0.87 ± 0.08		0.495	
Humedad (%)	58.06 ± 3.75	ab	40.27 ± 1.89	b	66.36 ± 10.48	a	55.72 ± 9.42	ab	48.31 ± 5.77	ab	0.010	
C. E. (dS)	0.25 ± 0.03	a	0.28 ± 0.0	a	0.14 ± 0.02	b	0.24 ± 0.01	a	0.13 ± 0.01	b	0.001	
P (mg Kg⁻¹)	7.96 ± 0.28	a	0.33 ± 0.05	b	0.68 ± 0.38	b	0.20 ± 0.01	b	0.26 ± 0.02	b	0.001	
M. O. (%)	5.91 ± 0.39	bc	5.46 ± 0.90	c	4.79 ± 0.40	c	10.89 ± 0.40	a	7.14 ± 0.19	b	0.001	
C. O. (%)	3.43 ± 0.23	bc	3.17 ± 0.52	c	2.78 ± 0.23	c	6.31 ± 0.23	a	4.14 ± 0.11	b	0.001	
Nitrógeno total (%)	0.25 ± 0.05	bc	0.15 ± 0.01	c	0.32 ± 0.03	b	0.47 ± 0.07	a	0.30 ± 0.02	b	0.001	
Bases intercambiables (Cmol Kg⁻¹)	K	0.41 ± 0.02	b	0.36 ± 0.02	bc	0.33 ± 0.02	c	0.38 ± 0.02	bc	0.76 ± 0.05	a	0.001
	Ca	1.93 ± 0.38	c	6.79 ± 1.1	a	2.96 ± 0.47	bc	6.83 ± 0.35	a	4.12 ± 0.41	b	0.001
	Mg	1.13 ± 0.37	c	4.26 ± 0.64	a	1.43 ± 0.18	bc	2.29 ± 0.04	b	1.58 ± 0.08	bc	0.001
	Na	1.02 ± 0.02	ab	0.91 ± 0.00	bc	0.88 ± 0.02	c	0.90 ± 0.01	bc	1.14 ± 0.11	a	0.001
CIC (Cmol Kg⁻¹)	7.88 ± 0.25	c	15.56 ± 1.48	b	15.02 ± 0.31	b	18.40 ± 0.32	a	14.29 ± 0.24	b	0.001	
Micronutrientes (mg Kg⁻¹)	Zn	0.66 ± 0.04	b	2.88 ± 0.18	a	0.53 ± 0.21	b	2.55 ± 0.47	a	0.50 ± 0.12	b	0.001
	Mn	1.40 ± 0.20	c	8.96 ± 0.20	a	2.05 ± 0.54	bc	3.67 ± 1.47	b	0.86 ± 0.10	c	0.001
	Cu	2.48 ± 0.46	b	3.45 ± 0.23	a	3.14 ± 0.08	a	2.80 ± 0.12	ab	1.05 ± 0.05	c	0.001
	Fe	140.45 ± 12.95	a	50.50 ± 0.90	b	11.46 ± 3.26	c	51.6 ± 14.20	b	20.79 ± 2.95	c	0.001
								0				

5.3 NUTRICIÓN VEGETAL

Los resultados obtenidos para los análisis de la hoja del cafeto se pueden observar en la Tabla 5: el P ($660.01 \text{ mg Kg}^{-1}$) y K ($17297.22 \text{ mg Kg}^{-1}$) presentaron los valores más altos significativamente ($p = 0.001$) en rusticano. Así, como en el contenido de micronutrientes Zn (12.50 mg Kg^{-1} , $p = 0.015$) y Fe ($271.24 \text{ mg Kg}^{-1}$, $p = 0.001$).

Por otro lado, el N (2.98 %), Ca ($15160.23 \text{ mg Kg}^{-1}$) y Mg ($5362.29 \text{ mg Kg}^{-1}$) fueron altos significativamente ($p = 0.001$) en monocultivo bajo sombra; y significativamente bajos para rusticano, con valores de $10967.89 \text{ mg Kg}^{-1}$ y $2833.22 \text{ mg Kg}^{-1}$ respectivamente. Rusticano también presentó los valores significativamente ($p = 0.001$) más bajos para Mn (33.33 mg Kg^{-1}). La concentración de Na para los cinco métodos de cultivo no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.585$).

Tabla 5. Propiedades de las hojas del café por sistema de manejo (Elaboración propia).

Elemento	Monocultivo Bajo sol		Policultivo tradicional		Policultivo comercial		Monocultivo bajo sombra		Rusticano		<i>p</i>
N (%)	1.20 ± 0.16	c	2.60 ± 0.11	ab	2.30 ± 0.26	b	2.98 ± 0.13	a	2.79 ± 0.12	a	0.001
P (mg Kg⁻¹)	290.20 ± 75.19	b	156.02 ± 3.65	b	156.02 ± 24.56	b	295.18 ± 47.78	b	660.01 ± 92.80	a	0.001
K	9659.61 ± 273.63	bc	11558.43 ± 1277.80	b	8866.94 ± 491.44	c	12029.73 ± 1325.15	b	17297.22 ± 533.73	a	0.001
Ca	10021.27 ± 40.00	b	14233.60 ± 714.97	a	16233.93 ± 842.88	a	15160.23 ± 1477.44	a	10967.89 ± 924.96	b	0.001
Mg	2804.05 ± 187.49	c	3745.70 ± 229.14	b	3478.99 ± 220.78	bc	5362.29 ± 245.82	a	2833.22 ± 349.99	c	0.001
Zn	10.42 ± 0.42	b	12.92 ± 0.42	a	12.92 ± 0.42	a	11.45 ± 1.46	ab	12.50 ± 0.83	ab	0.015
Mn	37.50 ± 3.33	b	53.33 ± 2.50	a	50.73 ± 4.89	a	60.21 ± 3.54	a	33.33 ± 5.00	b	0.001
Na	248.88 ± 28.09		244.71 ± 14.49		262.07 ± 16.25		262.07 ± 10.42		248.32 ± 1.67		0.585
Fe	100.83 ± 5.83	c	91.66 ± 1.67	c	96.25 ± 4.10	c	144.79 ± 13.12	b	271.24 ± 12.08	a	0.001

5.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Se realizó un análisis de componentes principales con todas las variables del suelo (físicas, químicas y microbiológicas) y los nutrientes de la hoja, el 59.6% de la variabilidad puede ser explicada por dos dimensiones principales, Dim 1 (33,6%) y Dim 2 (26%). En este análisis se mostró una agrupación de los métodos de cultivo, destacando lo siguiente: las parcelas pertenecientes al sistema rusticano tienen propiedades similares, por lo que se agruparon en el Cluster 1 (20%), y se diferencian de las parcelas de los sistemas monocultivo bajo sol, monocultivo bajo sombra, policultivo tradicional y policultivo comercial. Estas últimas se agruparon en el Cluster 2 (80%), por lo que se muestran diferencias entre los sistemas de cultivo, separando el método Rusticano, que tiene una mínima intervención en el ecosistema, de aquellos que presentan mayor modificación (Figura 35).

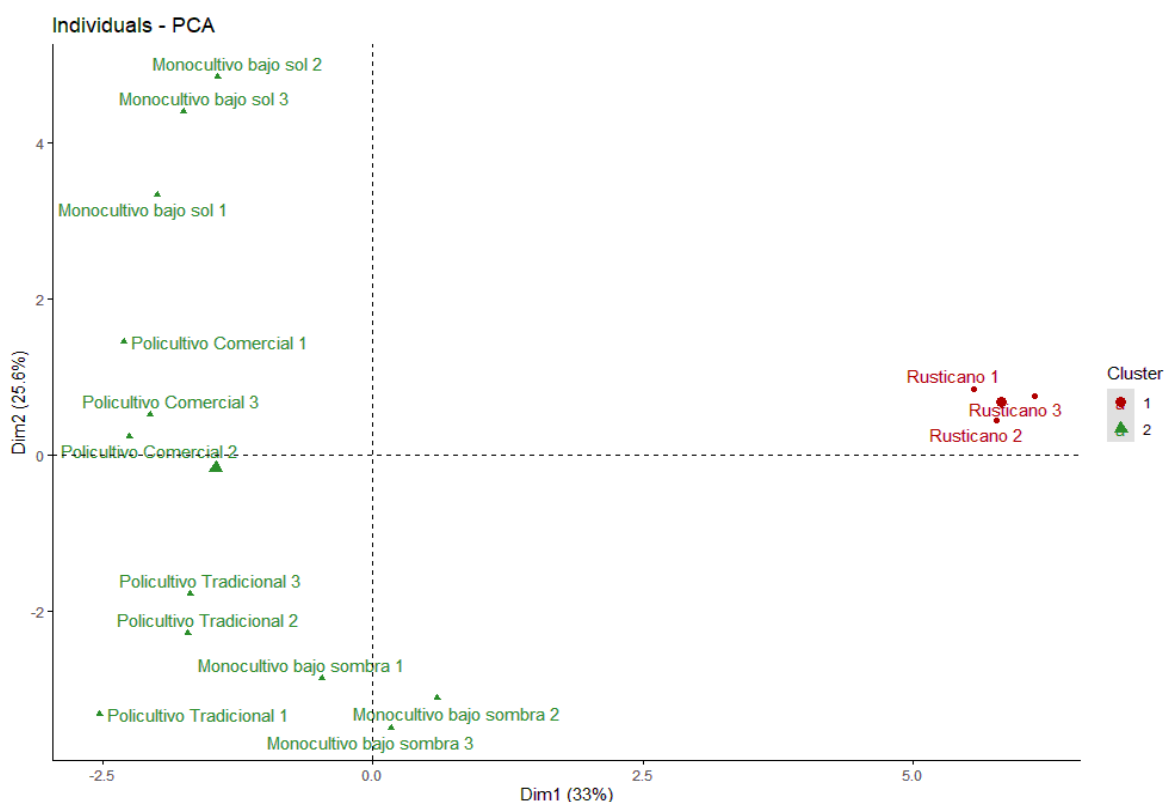


Figura 36. Análisis de componentes principales para los 5 métodos de cultivo.

Posteriormente, se analizó la relación de las variables con los métodos de cultivo, los resultados indicaron que las variables con mayor contribución a la variabilidad de las dimensiones principales fueron aquellas con una contribución mayor al promedio (3.25%) para Dim 1 y Dim 2: Fe (hoja) > N (hoja) > Cu > K (suelo) > bacterias mesofílicas > bacterias nitrificantes > actinomicetos > CIC > K (hoja) > Ca > bacterias desnitrificantes > Na > P (suelo) > Zn > P (hoja) > Hongos (Figura 36). El sistema Rusticano se relaciona Fe (hoja) > K (suelo) > actinomicetos > K (hoja) > Na > P (hoja) > Hongos. El monocultivo bajo sombra mostró relación con las variables de N (hoja) > bacterias mesofílicas > CIC > Ca. Los

métodos de policultivo comercial y monocultivo bajo sol presentaron relación con bacterias nitrificantes > bacterias desnitrificantes > P (suelo) y policultivo tradicional únicamente se relacionó con Cu > Zn.

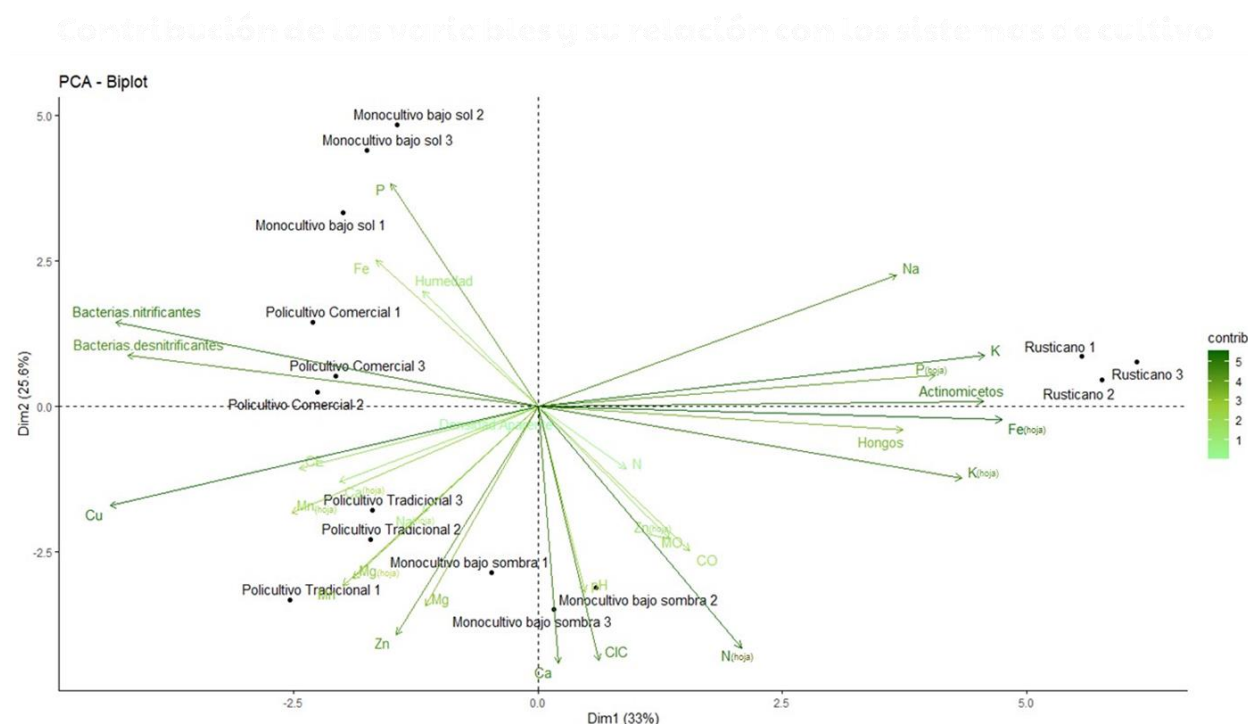


Figura 37. Análisis de componentes principales (PCA) para los nutrientes en hoja, propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo. §: Nutrientes en hoja de café. CIC: Capacidad de intercambio catiónico.

5.5 SALUD DEL SUELO Y NUTRICIÓN VEGETAL

La salud del suelo es resultado de las interacciones entre propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan su función (Chaudhari et al., 2020; Doran & Zeiss, 2000). El sistema de cultivo rusticano presentó altas cantidades de K en suelo ($0.76 \text{ Cmol Kg}^{-1}$), considerado como alto de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2001 ($>0.6 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002) y la dosis recomendada del cultivo ($> 0.4 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) (Sadeghian, 2018). Existe alta participación de las poblaciones de actinomicetos ($0.83 \times 10^6 \text{ CFU g}^{-1}$ suelo), hongos ($0.59 \times 10^6 \text{ CFU g}^{-1}$ suelo) y bacterias mesofílicas ($30.16 \times 10^6 \text{ cel g}^{-1}$ suelo) (Liang et al., 2022) involucradas en la movilización de este nutriente hacia la planta ($17297.22 \text{ mg Kg}^{-1}$) para procesos de resistencia contra enfermedades fúngicas y fotosíntesis (de Fátima Pereira Silva et al., 2023; Ramírez-Builes & Küsters, 2021). Las cantidades de K en el método de cultivo rusticano se encuentran en el rango óptimo de producción ($15800\text{-}21499.99 \text{ mg Kg}^{-1}$) (Sadeghian, 2018).

Por otro lado, el sistema de cultivo rusticano presentó la mayor cantidad de P asimilable ($660.01 \text{ mg Kg}^{-1}$), este se encuentra por debajo del rango óptimo del cultivo ($1400\text{-}2000 \text{ mg}$

Kg^{-1}), por lo que existe una deficiencia en la planta y puede afectar negativamente el rendimiento (Scalco et al., 2014); (Sadeghian, 2022). Otros micronutrientes que fueron cuantificados como el Cu, que está presente en todos los sistemas de cultivo en cantidades de 1.05 mg Kg^{-1} a 3.45 mg Kg^{-1} las cuales son adecuados para este tipo de suelo ($1.0 - 3.0 \text{ mg Kg}^{-1}$) (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002);(Sadeghian, 2018). El Cu se puede relacionar con la respiración y fotosíntesis de la planta, metabolismo de carbohidratos y N, actividad antioxidante y procesos de lignificación (Martinez et al., 2018). La presencia de Na y K en el suelo compiten con el Cu en el sistema del cultivo de café. Este sistema también presentó la mayor concentración de Fe ($271.24 \text{ mg Kg}^{-1}$) en la hoja, involucrado para procesos de fotosíntesis en cultivos de etapa productiva (Covre et al., 2018) para un rango óptimo ($54-121 \text{ mg kg}^{-1}$) (Sadeghian, 2018), por lo que se puede inferir que en este sistema se favorece la asimilación de este nutriente por la acidez del suelo.

La CIC puede afectar la disponibilidad de nutrientes en el suelo para la planta, ya que influye en la retención de cationes como el Ca, como se observó en el sistema de monocultivo bajo sombra, donde el valor de la CIC ($18.40 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) es considerada media ($15-25 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002);(Sadeghian, 2018), la asimilación de N, presentó la concentración más alta (2.98%) de acuerdo con el rango óptimo del cultivo (2.36-2.78%) (Sadeghian, 2022).

En los sistemas de Policultivo Comercial y Monocultivo Bajo Sol existe baja disponibilidad de P para las poblaciones bacterianas mesofílicas y el cafeto. También existe alta pérdida de N por procesos de nitrificación y desnitrificación que han sido documentados en otros sistemas intensivos de cultivo (Wang et al., 2018). El P en todos los métodos de cultivo es considerado deficiente a la dosis recomendada para el cultivo de café (10 mg Kg^{-1}) (Sadeghian, 2018).

5.6 INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

Los resultados de las entrevistas aplicadas indicaron que los miembros de la cooperativa se dividen en cinco grupos: los representantes de cada grupo se reúnen una vez a la semana, y todos los miembros de la cooperativa dos veces al mes. Reciben capacitación por parte del ingeniero (asesor técnico), Secretaria de Desarrollo Rural de Puebla (SDR), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y Centro Agroecológico del Café (CAFECOL), donde se capacitan todos los integrantes sobre temas relacionados con selección de semilla, germinación, trazo, plantación, nutrición, podas, manejo de sombra, cosecha, selección y calidad del café, procesos productivos, agregación de valor y comercialización. Estas capacitaciones se realizan de 2 a 3 veces por mes y de manera continua durante todo el ciclo fenológico del café. Se practican rituales para pedir por buenas cosechas, como oraciones, ofrendas en la iglesia a la virgen de Ocotlán y colocación de cruces en las parcelas. El rango de edad de los productores es de 33 a 70 años, y todos trabajan tierras propias, las cuales consideran que continuarán trabajando sus hijos. En la tabla 6 se observan los principales resultados obtenidos en las entrevistas para los productores de cada sistema de cultivo.

Para el sistema de monocultivo bajo sol, los productores tienen un grado de estudios de primaria y secundaria. Sus parcelas se ubican de 100 m a 1 km de su vivienda y se trasladan a pie. Llevan cultivando café durante 15 a 30 años, porque consideran que es lo único que se puede comercializar en el municipio. Algunos miembros de sus familias han migrado a la ciudad para tener mejores oportunidades de estudio y trabajo. En sus viviendas tienen acceso a agua, electricidad y descarga, al igual que servicios de salud. Poseen parcelas de 1 a 7 ha, y el promedio de su producción anual es de 8.5 quintales por ha, dependiendo del tamaño de la parcela. Venden su producto a compradores independientes y a los que llama “coyotes”, lo comercializan como “café pergamino” a un costo de \$40-45 por Kg. En las parcelas trabajan miembros de la familia y contratan mano de obra para trabajos de corte, poda, chapeo y fertilización, pagando \$225 por día a cada trabajador, participan de 2 a 10 mujeres en el proceso de producción. Las plantas de café las obtienen de un vivero propio, por lo que los principales costos de producción son fertilizantes y mano de obra o jornales. Los productores tienen otros cultivos separados del café, como naranja, plátano, mamey, maíz y cedro, los cuales cultivan para autoconsumo y a pesar de tener ingresos de otras fuentes, su principal fuente económica es el cultivo de café, del cual dependen de dos a cinco miembros de la familia.

Los productores que trabajan bajo Policultivo Comercial tienen como último grado de estudios la primaria, y se trasladan de su vivienda a la parcela caminando o en transporte público, sus parcelas se encuentran a 3 km de su residencia. Llevan cultivando café aproximadamente 50 años, debido a que consideran que es lo que pueden cultivar en su parcela y algunos miembros de su familia han emigrado del municipio. Tienen acceso a agua potable, electricidad y servicios sanitarios, además de contar con acceso a salud y educación. Tienen una producción anual de 5.3 quintales por ha y sus parcelas son de una superficie

aproximada de 2.75 ha. El café lo venden "molido", y contratan mano de obra para las actividades de corte de café, poda y fertilización, pagando \$250 al día a cada trabajador, en todo el proceso de producción participan aproximadamente 10 mujeres. Los principales costos de inversión son mano de obra y fertilización, no tienen acceso a ningún tipo de créditos o préstamos, por lo que el total de la inversión se realiza con recursos propios. Su principal fuente de ingreso es el cultivo de café, del cual dependen aproximadamente 5 integrantes de sus familias.

En el sistema de Policultivo Tradicional los productores tienen como último grado de estudio la secundaria y/o bachillerato. Sus parcelas se encuentran de 1 a 3 km de distancia de sus viviendas, y se trasladan a pie o en transporte público. Han cultivado café por 6 a 10 años por que la consideran la principal actividad y fuente de trabajo de la región, no tienen miembros de su familia que hayan emigrado del municipio. Tienen acceso a agua potable, electricidad, servicios sanitarios, además de acceso a la educación. Producen 13.3 quintales de café por ha, con parcelas de una extensión de 0.25-1.25 ha. El café que producen lo venden como café pergamino(\$38/kg) y molido (\$140/kg), se ofrece a "coyotes" y compradores particulares. El trabajo que se realiza es familiar y contratan mano de obra para actividades de corte, poda y fertilización, pagando \$200 por día a cada trabajador y únicamente participa una mujer en el proceso de producción. Las plantas que cultivan las obtienen por vivero propio, programas del gobierno y compra a viveros externos, buscando aquellas variedades que tengan mayor producción y resistencia a plagas. No tienen acceso a créditos o préstamos, únicamente el apoyo del gobierno en fertilizantes y plantas. Además del café, cultivan maíz y pimienta, la cual utilizan para autoconsumo y comercialización, el cultivo de café es su principal fuente de ingreso, debido a que no poseen de otras fuentes, y de dos a cuatro miembros de su familia dependen de sus ingresos.

Los productores de Monocultivo Bajo Sombra poseen como último grado de estudios la secundaria. Sus viviendas se encuentran a aproximadamente 0.5 km de las parcelas que trabajan, por lo que se trasladan caminando. Han cultivado café por 10 años, debido a la herencia familiar, a pesar de que algunos miembros de su familia han emigrado de la ciudad en busca de mejores oportunidades de trabajo. Los servicios a los que tienen acceso en sus viviendas son agua potable, electricidad y servicios sanitarios; sin embargo, no tienen acceso a la educación. La producción anual es de 4 quintales por ha, con una parcela de 0.5 ha. El café que producen la comercializan con "coyotes", vendiéndolo como café pergamino a \$60/kg. Adquieren las plantas de vivero propio, seleccionando las variedades que presenten mayor producción y resistencia a enfermedades. El trabajo lo realiza únicamente el responsable de la parcela y en ocasiones se contrata mano de obra, por lo que los principales costos de producción son los fertilizantes y los jornales, participan dos mujeres en el proceso de producción. No tienen acceso a créditos o préstamos, únicamente cuentan con el apoyo del gobierno para fertilizantes, los cuales cubren un 5% de la inversión anual. Su principal y única actividad y fuente de ingreso es el cultivo del café, del cual dependen de una a dos personas.

Para el sistema Rusticano, los productores tienen como último grado de estudio licenciatura y/o maestría. Sus parcelas se encuentran a 3 km de sus viviendas y se trasladan en auto propio. Llevan produciendo café por 15 años y lo consideran una tradición. Poseen miembros de su familia que han emigrado de la ciudad y en el caso de un productor, su familia regresó al municipio de Cuetzalan. Tienen acceso a todos los servicios, incluyendo los de salud y educación. Su producción anual es de 7 quintales por hectárea, con una extensión de parcela de 1 ha. Las plantas las obtienen de vivero propio. El café lo comercializan al público en general en forma de café tostado, a \$200/kg. El trabajo lo realizan de manera familiar y contratan trabajadores para actividades de corte y fertilización, en el proceso de producción participan tres mujeres. La inversión la cubren con capital propio y el principal costo de producción es la mano de obra. Tienen ingresos de otras fuentes, por lo que el café no es su principal fuente de ingresos y el número de miembros de su familia que dependen de sus ingresos son dos.

Tabla 6. Caracterización de las dimensiones social y económica (Elaboración propia).

	MONOCULTIVO BAJO SOL	POLICULTIVO TRADICIONAL	POLICULTIVO COMERCIAL	MONOCULTIVO BAJO SOMBRA	RUSTICANO
Edad del productor en años	66	33-53	56	70	46
Último grado de estudios	Primaria-Secundaria	Bachillerato, secundaria	Primaria	Secundaria	Maestría
Tipo de tenencia de las tierras	Propias	Propias	Propio	Propias	Propias
Distancia de su vivienda a su parcela	0-100m a 1 km	1 - 3 km	3 km	0.5 km	3 km
Tiempo de traslado de la vivienda a su parcela	0-20 minutos	15-60 minutos	15-20 minutos	15 minutos	20 minutos
Modo de transporte	Caminando	Caminando y transporte público	Caminando y transporte público	Caminando	Auto Propio
Tipo de camino	Accesible	Carretera	Pavimentado	Terracería	Carretera
Tiempo produciendo café	15-30 años	6-10 años	50 años	10 años	15 años
Motivo para seguir produciendo café	Es lo que consideran que se puede comerciar en Cuetzalan	Principal actividad y fuente de trabajo	Es lo que se da en la parcela	Por herencia familiar	Por tradición
En un futuro, ¿quién va a trabajar sus parcelas?	Hijos	Hijos	Hijos	Hijo	Hijo
Miembros de su familia ha emigrado de la ciudad	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Razones principales de la emigración	Estudio y trabajo	Trabajo	Trabajo	Trabajo	Su familia regresó a la ciudad
Servicios que tienen en sus viviendas	Agua, electricidad y descarga	Todos	Todos	Todos	Todos

	MONOCULTIVO BAJO SOL	POLICULTIVO TRADICIONAL	POLICULTIVO COMERCIAL	MONOCULTIVO BAJO SOMBRA	RUSTICANO
Acceso a servicios de salud y educación	Salud	Sí (1 salud no)	Sí	No	Sí
Distancia de los centros de salud más cercanos	100 km	0.3-1 km	0.25 km	0.5 km	1 km
Distancia de los centros de educación más cercanos	500 m-1 km	7-200m	1.5 km	200 m	500 m
Producción anual por hectárea	8.5 quintales	13.3 quintales	5.3 quintales	4 quintales	7 quintales
Tamaño de su parcela	1-7 ha	0.25-1.5 ha	2.75 ha	0.5 ha	1 ha
Origen de las plantas que cultiva	Vivero propio	Vivero propio, compra externa y programas del gobierno	Vivero propio	Vivero propio	Producción propia
Criterios para seleccionar la variedad que cultivan	Follaje, producción	Producción y resistencia a plagas	Producción	Producción y resistencia a enfermedades	Adecuado a la altura
¿A quién venden el café?	Compradores independientes, coyotes	Coyote, acopio particular, compradores	Compradores independientes, coyotes	Coyotes	Público en general
Forma en que venden el café	Pergamino	Pergamino y molido	Molido	Pergamino	Tostado
Precio de venta por kilogramo	\$40-45	Pergamino \$38, molido \$160	\$150	\$60	\$200
Tipo de trabajo (familiar o contratan trabajadores)	Familiar y jornaleros	Familiar y jornaleros	Jornaleros	Sólo	Familiar y jornaleros
Actividades para las que contratan trabajadores	Corte, Poda, chapeo y fertilización	Corte, Poda, chapeo y fertilización	Corte, Poda, chapeo y fertilización	Chapeo, poda	Corte y campo

	MONOCULTIVO BAJO SOL	POLICULTIVO TRADICIONAL	POLICULTIVO COMERCIAL	MONOCULTIVO BAJO SOMBRA	RUSTICANO
Cambios para conseguir esta mano de obra en relación con periodos anteriores	Sí	Sí	-	Sí	No
Número de mujeres que participan en el proceso de producción	2-10	1	10	2	3
Aplicación de medidas de conservación del suelo	Terrazas, curvas de nivel y hojarasca	Terrazas y curvas de nivel	Terrazas y curvas de nivel	No aplica	Terrazas y curvas de nivel
Implementación de estrategias para adaptarse a las variaciones del clima	Sombra	Sombra	Sombra	Sombra	No
Principales costos de producción	Fertilizante, mano de obra	Fertilizante, pesticidas, mano de obra, plantas	Mano de obra y fertilizantes	Mano de obra	Mano de obra
Tipo de capital para cubrir la inversión/costos de producción	Capital propio	Capital propio	Capital propio	Capital propio	Capital propio
Ingresos de otras fuentes	Sí	No	No	No	Sí
Producción de café como principal fuente de ingreso	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Número de miembros de la familia dependen de sus ingresos	2-5	2 -4	5	1	2

5.7 ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD

La evaluación de la sustentabilidad se realizó con la metodología MESMIS, se compararon los cinco métodos de cultivo (Monocultivo Bajo Sol, Monocultivo Bajo Sombra, Policultivo Tradicional, Policultivo Comercial y Rusticano). Los indicadores seleccionados y la forma de medición se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Forma de Medición o Estimación de Indicadores

Indicador estratégico	Forma de Medición o Estimación
Producción	Entrevista a productores (Producción anual de café en quintales por hectárea)
Ingreso neto	Entrevista a productores (Ingreso anual por hectárea por venta de café)
Edad de la planta	Entrevista a productores (Edad promedio del cultivo)
Variedades de café	Entrevista a productores (Número de variedades de café)
Otras especies vegetales	Entrevista a productores y visita en campo (Número de especies que acompañaban al café en la misma parcela)
Policultivo	Entrevista a productores y visita en campo (Número de especies que se cultivan en la misma parcela del café y se comercializan)
Incidencia de plagas y enfermedades	Entrevista a productores y visita en campo (Porcentaje de plantas afectadas por roya)
Diversidad Microbiológica	Análisis de poblaciones de bacterias mesofílicas, hongos y actinomicetos totales, bacterias nitrificantes y desnitrificantes
Nutrición del cafeto	Análisis de laboratorio (determinación de nutrientes en la hoja del cafeto)
Uso de métodos de conservación del suelo	Entrevista a productores y visita en campo (Número de métodos utilizados)
Salud del suelo	Análisis de Laboratorio (determinación de nutrientes y poblaciones de microorganismos en el suelo)
Uso de fertilizantes y plaguicidas	Entrevista a productores (Consideraciones para aplicar fertilizantes)
Escolaridad	Entrevista a productores (Último grado de estudios)
Acceso a servicios básicos	Entrevista a productores (Número de servicios a los que tienen acceso en sus viviendas)
Permanencia de los productores en el sistema	Entrevista a productores (Años que llevan produciendo café)
Superficie por sistema	Entrevista a productores (Superficie de la parcela en hectáreas)
Ingresos de Otras Fuentes	Entrevista a productores (Ingresos de otras fuentes además de la producción de café)
Participación de mujeres en el proceso de producción	Entrevista a productores (Número de mujeres que participan en el proceso de producción)
Capacitación	Entrevista a productores (Porcentaje de productores que asisten a las capacitaciones)
Derechos de propiedad	Entrevista a productores (Tipo de derechos de propiedad)
Participación en toma de decisiones	Entrevista a productores (Porcentaje de productores que asisten a las asambleas y participan en la toma de decisiones)

Se consideraron las escalas propuestas por Farfán, V.F., 2014 para edad de la planta, otras especies vegetales, incidencia de plagas y enfermedades, uso de fertilizantes y plaguicidas. Se estableció el valor máximo posible en la zona de estudio para producción, ingreso neto, variedades de café, policultivo, población microbiana, uso de métodos de conservación del suelo, escolaridad, acceso a servicios básicos, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación y participación en toma de decisiones. Para nutrición del cafeto, salud del suelo, ingresos de otras fuentes y derechos de propiedad se estableció una escala de acuerdo con los valores obtenidos en la zona de estudio, mientras que para diversidad microbológica se seleccionó el índice de Margalef.

- **Producción:** La producción se determinó mediante entrevistas a los productores, se obtuvieron los datos de producción anual de café en quintales por hectárea.
- **Ingreso neto:** Por medio de las entrevistas, se obtuvo el precio de venta del café y se multiplicó por la producción por hectárea para obtener el ingreso anual por hectárea por la venta de café.

$$\text{Ingreso neto anual} = (\text{Producción en quintales por hectárea})(\text{Precio de venta del producto})$$

- **Edad de la planta:** La edad promedio de los cafetos se obtuvo mediante las entrevistas. Posteriormente, se utilizó esta información con la escala propuesta por Farfán, V. F. (2014) (Tabla 8).

Tabla 8. Escala para la edad del cultivo de café

Edad del cultivo del café (años)		
PRF	Escala de Valoración	Interpretación
1	>10 años	Cafetal muy viejo
2	8 – 9 años	Cafetal viejo
3	6 – 7 años	Cafetal relativamente joven
4	4 – 5 años	Cafetal joven (productivo)
5	< 4 años	Cafetal muy joven (productivo)

- **Variedades de café:** Se determinó el número de variedades de café presentes en las parcelas mediante las entrevistas.
- **Otras especies vegetales:** Mediante las visitas de campo y entrevistas a los productores se estimó el número de otras especies de árboles de sombrero que se encontraban en la misma parcela que el cafeto, y posteriormente se utilizó la escala de valoración de Farfán V. F., 2014 (Tabla 9).

Tabla 9. Escala para otras especies vegetales

Número de especies de árboles de sombrío por hectárea		
PRF	Escala de Valoración	Interpretación
1	> 12	Demasiado número de especies de árboles
2	10 – 12	Muy alto número de especies de árboles
3	7 – 9	Alto número de especies de árboles
4	5 – 6	Moderado número de árboles
5	1 – 4	Adecuado número de especies de árboles

- **Policultivo:** Con visita a campo y entrevistas se determinó el número de especies que se cultivan en la misma parcela del café y tienen el objetivo de comercializarse por el productor.
- **Incidencia de plagas y enfermedades:** Se consideró la incidencia de roya del cafeto y mediante entrevistas los productores indicaron el porcentaje de plantas afectadas por roya. Con el porcentaje proporcionado, se utilizó la escala de valoración de Farfán V. F., 2014 (Tabla 10).

Tabla 10. Escala para incidencia de plagas y enfermedades

Incidencia de roya del cafeto		
PRF	Escala de Valoración	Interpretación
1	>20.0%	Muy alto porcentaje de incidencia
2	15.1% - 20.0%	Alto porcentaje de incidencia
3	10.1% - 15.0%	Porcentaje medio de incidencia
4	5.0% - 10.0%	Bajo porcentaje de incidencia
5	< 5.0%	Muy bajo porcentaje de incidencia

- **Diversidad Microbiológica:** Se realizaron análisis de laboratorio para determinar las poblaciones de bacterias mesofílicas, hongos y actinomicetos totales, bacterias nitrificantes y desnitrificantes. Con los valores obtenidos se calculó el índice de Margalef.
- **Nutrición del cafeto:** Se determinaron los nutrientes en la hoja mediante análisis de laboratorio y se estableció una escala propia. Para la escala, se utilizó la fórmula para obtener el tamaño de los intervalos, y se seleccionó un número de 3 intervalos (Tabla 11).

$$\text{Tamaño de los intervalos} = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{3}$$

Tabla 11. Escala para los nutrientes del indicador nutrición del cafeto

	N	P	Mg	K	Ca	Fe
Mínimo	1.20	156.02	2804.05	8866.94	10021.27	91.66
Máximo	2.98	660.01	5362.29	17297.22	16233.93	271.24
Rango:	1.78	503.99	2558.24	8430.28	6212.66	179.58
Intervalos	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

Tamaño	0.59	168.00	852.75	2810.09	2070.89	59.86
Intervalo (+0)	1.20 - 1.79	156.02 -324.02	2804.05 -3656.80	8866.94 -11677.03	10021.27 -12092.16	91.66 -151.52
Intervalo (+1)	1.79 - 2.39	324.02 -492.01	3656.80 -4509.54	11677.03 -14487.13	12092.16 -14163.04	151.52 -211.38
Intervalo (+2)	2.39 - 2.98	492.01- 660.01	4509.54 5362.29	14487.13 -17297.22	14163.04 -16233.93	211.38 -271.24

Una vez establecidos los intervalos, se asignó un valor o puntaje (0, 1 y 2), los cuales se sumaron para obtener el valor final de nutrición vegetal para cada método de cultivo (Tabla 12).

Tabla 12. Puntaje de nutrición vegetal

Propiedad	N _t (%)	P (ppm)	Mg (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Ca (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Suma
Monocultivo Bajo Sol	1.20 ± 0.16	290.20 ± 75.19	2804.05 ± 187.49	9659.61 ± 273.63	10021.27 ± 40.00	100.83 ± 5.83	0
	0	0	0	0	0	0	
Policultivo Tradicional	2.60 ± 0.11	156.02 ± 3.65	3745.70 ± 229.14	11558.43 ± 1277.80	14233.60 ± 714.97	91.66 ± 1.67	5
	2	0	1	0	2	0	
Policultivo Comercial	2.30 ± 0.26	156.02 ± 24.56	3478.99 ± 220.78	8866.94 ± 491.44	16233.93 ± 842.88	96.25 ± 4.10	3
	1	0	0	0	2	0	
Monocultivo Bajo Sol	2.98 ± 0.13	295.18 ± 47.78	5362.29 ± 245.82	12029.73 ± 1325.15	15160.23 ± 1477.44	144.79 ± 13.12	7
	2	0	2	1	2	0	
Rusticano	2.79 ± 0.12	660.01 ± 92.80	2833.22 ± 349.99	17297.22 ± 533.73	10967.89 ± 924.96	271.24 ± 12.08	8
	2	2	0	2	0	2	

- **Uso de métodos de conservación del suelo:** Con las observaciones realizadas en campo y las entrevistas se determinó el número de métodos de conservación del suelo que utilizaron, entre las que se encuentran terrazas, curvas de nivel, aumento o introducción de sombra.
- **Salud del suelo:** Se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo, así como las poblaciones de microorganismos presentes en el suelo, posteriormente se estableció una escala propia. Para la escala, se utilizó la fórmula para obtener el tamaño de los intervalos, y se seleccionó un número de 3 intervalos (Tabla 13).

$$\text{Tamaño de los intervalos} = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{3}$$

Tabla 13. Escala para las propiedades de salud del suelo

	CE	P	CO	MO	N	CIC	K	CU	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
Mínimo	0.13	0.2	2.78	4.79	0.15	7.88	0.33	1.05	2450000	229000	47000
Máximo	0.28	7.96	6.31	10.89	0.47	18.4	0.76	3.45	30160000	825000	592000
Rango:	0.15	7.76	3.53	6.1	0.32	10.52	0.43	2.4	27710000	596000	545000
Intervalos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tamaño	0.05	2.59	1.18	2.03	0.11	3.51	0.14	0.80	9236666.67	198666.66	181666.66
Intervalo (+0)	0.13-0.18	0.2-2.79	2.78-3.96	4.79-6.82	0.15-0.26	7.88-11.39	0.33-0.47	1.05-1.85	2450000-11686666.7	229000-427666.66	47000-228666.66
Intervalo (+1)	0.18-0.23	2.79-5.37	3.96-5.13	6.82-8.86	0.26-0.36	11.39-14.89	0.47-0.62	1.85-2.65	11686666.7-20923333.3	427666.66-626333.33	228666.66-410333.33
Intervalo (+2)	0.23-0.28	5.37-7.96	5.13-6.31	8.86-10.89	0.36-0.47	14.89-18.40	0.62-0.76	2.65-3.45	20923333.3-30160000	626333.33-825000	410333.33-592000

Una vez establecidos los intervalos, se asignó un valor o puntaje (0, 1 y 2), los cuales se sumaron para obtener el valor final de nutrición vegetal para cada método de cultivo (Tabla 14).

Tabla 14. Puntaje de salud del suelo

Propiedad	Monocultivo Bajo Sol		Policultivo Tradicional		Policultivo Comercial		Monocultivo Bajo Sol		Rusticano	
CE (dS)	0.25 ± 0.03	2	0.28 ± 0.0	2	0.14 ± 0.02	0	0.24 ± 0.01	2	0.13 ± 0.01	0
P (ppm)	7.96 ± 0.28	2	0.33 ± 0.05	0	0.68 ± 0.38	0	0.20 ± 0.01	0	0.26 ± 0.02	0
CO (%)	3.43 ± 0.23	0	3.17 ± 0.52	0	2.78 ± 0.23	0	6.31 ± 0.23	2	4.14 ± 0.11	1
MO (%)	5.91 ± 0.39	0	5.46 ± 0.90	0	4.79 ± 0.40	0	10.89 ± 0.40	2	7.14 ± 0.19	1
N _t (%)	0.25 ± 0.05	0	0.15 ± 0.01	0	0.32 ± 0.03	1	0.47 ± 0.07	2	0.30 ± 0.02	1
CIC (Cmol kg ⁻¹)	7.88 ± 0.25	0	15.56 ± 1.48	2	15.02 ± 0.31	2	18.40 ± 0.32	2	14.29 ± 0.24	1
K (Cmol kg ⁻¹)	0.41 ± 0.02	0	0.36 ± 0.02	0	0.33 ± 0.02	0	0.38 ± 0.02	0	0.76 ± 0.05	2
Cu (mg kg ⁻¹)	2.48 ± 0.46	2	3.45 ± 0.23	2	3.14 ± 0.08	2	2.80 ± 0.12	2	1.05 ± 0.05	0
Bacteria (x 10 ⁶ Cel. g ⁻¹ suelo)	2.456 ± 0.07	0	22.561 ± 0.24	2	19.604 ± 0.31	1	27.59 ± 0.34	2	30.16 ± 0.08	2
Actinomicetos (x 10 ⁶ CFU g ⁻¹ suelo)	0.346 ± 0.05	0	0.396 ± 0.01	0	0.229 ± 0.03	0	0.377 ± 0.02	0	0.825 ± 0.07	2

Hongos (x 10 ⁶ CFU g ⁻¹ suelo)	0.281 ± 0.00	1	0.396 ± 0.01	1	0.047 ± 0.00	0	0.264 ± 0.03	1	0.592 ± 0.03	2
Suma		7		9		6		15		12

- **Uso de fertilizantes y plaguicidas:** Mediante las entrevistas a productores, se obtuvo información de acuerdo con las consideraciones para aplicar fertilizantes, y se ubicaron en la escala de valoración “Empleo de fertilizantes químicos en el café” de Farfán V. F., 2014 (Tabla 15).

Tabla 15. Escala para uso de fertilizantes y plaguicidas

Empleo de fertilizantes químicos en el café		
PRF	Escala de Valoración	Interpretación
1	Muy mal	No se fertiliza el café
2	Mal	Se aplica cualquier dosis, a cualquier momento y sin análisis de suelos
3	Regular	Se aplica la dosis, a cualquier momento y sin análisis de suelos
4	Bien	Se aplica la dosis y frecuencia, sin análisis de suelos
5	Muy bien	Se aplica la dosis y frecuencia, según análisis de suelos

- **Escolaridad:** Con la aplicación de las entrevistas se obtuvo el último grado de los productores y se le asignó el valor de 1 punto por grado de estudios.
- **Acceso a servicios básicos:** Se determinó el acceso a servicios básicos mediante entrevistas. Se determinó el número de servicios a los que tienen acceso en sus viviendas, se consideraron agua potable, electricidad, servicios sanitarios, salud y educación, y se asignó el valor de 1 punto por cada servicio al que tienen acceso.
- **Permanencia de los productores en el sistema:** Mediante entrevista a los productores se obtuvo la información de los años que llevan produciendo café.
- **Superficie por sistema:** Por medio de entrevistas, se obtuvo la superficie total cultivada en hectáreas.
- **Ingresos de Otras Fuentes:** Se consideraron ingresos externos a la producción del café, y se asignó un valor de 1 si tenían ingresos de otras fuentes y 0 si su única fuente de ingreso era la producción de café.
- **Participación de mujeres en el proceso de producción:** Por medio de entrevistas a los productores, se estimó el número de mujeres que participan en todo el proceso de producción, considerando todas las etapas del proceso.
- **Capacitación:** Para la capacitación, por medio de las entrevistas se estimó el porcentaje de productores que asisten a las capacitaciones impartidas a los miembros de la cooperativa.
- **Derechos de propiedad:** Se consideró el tipo de derechos de propiedad, y se asignó el valor de 1 si las parcelas eran propias y 0 si eran ejido.

- **Participación en toma de decisiones:** Mediante las entrevistas se estimó el porcentaje de productores que asisten a las asambleas mensuales y participan en la toma de decisiones de la cooperativa.

Una vez que se obtuvieron los valores, se seleccionaron los criterios que se consideraron como óptimos para cada indicador (Tabla 16), se asignó a cada indicador un valor en la escala de 0 al 100, en donde el 0 corresponde al valor más negativo, y el 100 al valor óptimo o ideal que podría tener el sistema.

Tabla 16. Definición de valores óptimos y cálculo de valores ponderados de los indicadores de sustentabilidad

Indicador estratégico	Unidades	Monocultivo bajo sol	Policultivo tradicional	Policultivo Comercial	Monocultivo bajo sombra	Rusticano	Valor óptimo	Criterio
Producción	Q/ha/año	8.5	13.3	5.3	4	7	13.3	Valor Máximo Posible
		64%	100%	40%	30%	53%	100%	
Ingreso neto	Ingreso neto anual	\$ 21,993.75	\$ 62,213.58	\$ 29,415.00	\$ 13,800.00	\$ 51,800.00	\$ 62,213.58	Valor Máximo Posible
		35%	100%	47%	22%	83%	100%	
Edad de la planta	Escala	5	5	5	1	5	5	Farfán V. F., 2014
		100%	100%	100%	20%	100%	100%	
Variedades de café	No. de variedades por parcela	4	3	1	3	2	4	Valor Máximo Posible
		100%	75%	25%	75%	50%	100%	
Otras especies vegetales	No. especies de sombra	0	10	10	10	12	12	Farfán V. F., 2014
		0%	83%	83%	83%	100%	100%	
Policultivo	No. especies que se comercializan	0	5	6	0	0	6	Valor Máximo Posible
		0%	83%	100%	0%	0%	100%	
Incidencia de plagas y enfermedades*	Escala (% de plantas afectadas por la roya)	2	1	1	1	1	5	Farfán V. F., 2014
		40%	20%	20%	20%	20%	100%	
Diversidad Microbiológica	Índice de Margalef	0.2036	0.2048	0.2070	0.2116	0.2298	0.2298	Valor Máximo Posible
		89%	89%	90%	92%	100%	100%	
Nutrición del cafeto	Escala	0	5	3	7	8	8	Valor Máximo Posible
		0%	63%	38%	88%	100%	100%	
Uso de métodos de conservación del suelo	No. métodos aplicados	3	2	2	0	2	3	Valor Máximo Posible
		100%	67%	67%	0%	67%	100%	
Salud del suelo	Escala	7	9	6	15	12	15	Valor Máximo Posible
		47%	60%	40%	100%	80%	100%	

Indicador estratégico	Unidades	Monocultivo bajo sol	Policultivo tradicional	Policultivo Comercial	Monocultivo bajo sombra	Rusticano	Valor óptimo	Criterio
Uso de fertilizantes y plaguicidas*	Escala	4	4	4	4	4	5	Farfán V. F., 2014
		80%	80%	80%	80%	80%	100%	
Escolaridad	Ultimo grado de estudios	2	3	1	2	5	6	Valor Máximo Posible
		33%	50%	17%	33%	83%	100%	
Acceso a servicios básicos	No. de servicios	3	5	5	5	5	5	Valor Máximo Posible
		60%	100%	100%	100%	100%	100%	
Permanencia de los productores en el sistema	Años produciendo café	30	10	50	10	15	50	Valor Máximo Posible
		60%	20%	100%	20%	30%	100%	
Superficie por sistema	Hectárea	7.00	1.5	2.75	0.5	1	7	Valor Máximo Posible
		100%	21%	39%	7%	14%	100%	
Ingresos de Otras Fuentes	Si= 1	1	0	0	0	1	1	Valor Máximo Posible
	No= 0	100%	0%	0%	0%	100%	100%	
Participación de mujeres en el proceso de producción	No. de mujeres involucradas	10	1	10	2	3	10	Valor Máximo Posible
		100%	10%	100%	20%	30%	100%	
Capacitación	Porcentaje de productores capacitados	100%	100%	100%	100%	100%	100%	Valor Máximo Posible
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Derechos de propiedad	Tipo de propiedad	Propias	Propias	Propio	Propias	Propias	Propias	Valor Máximo Posible
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Participación en toma de decisiones	Porcentaje de productores que participan en la toma de decisiones y asisten a las asambleas	100%	100%	100%	100%	100%	100%	Valor Máximo Posible
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	

5.8 REGRESIÓN LOGÍSTICA BINARIA

Con los datos de todos los indicadores de sustentabilidad se utilizó IBM SPSS Statistics (Versión 29.0; IBM Corp., 2024) para hacer un análisis de “Tablas Cruzadas” y la prueba de Chi-cuadrado de Pearson, comparando los diferentes métodos de cultivo con los valores de los indicadores de sustentabilidad. Los resultados indicaron que existe una asociación significativa entre el tipo de manejo en la Producción de café ($p=0.005$), ingreso neto ($p=0.002$), otras especies vegetales ($p=0.003$), policultivo ($p=0.021$), nutrición del cafeto ($p=0.015$), salud del suelo ($p=0.046$), número de años produciendo café ($p=0.011$) y número de mujeres que participan en el proceso de producción ($p=0.009$) (Tabla 17).

Además, se realizó un análisis de regresión logística binaria para evaluar la relación entre la producción de café con los métodos de cultivo y el resto de los indicadores de sustentabilidad: ingreso neto, otras especies vegetales, policultivo, nutrición del cafeto, salud del suelo, número de años produciendo café y número de mujeres que participan en el proceso de producción. El modelo de regresión logística tuvo un valor de Wald de 4.612 ($p = 0.032$), un Exp(B) de 0.25 (R^2 de Cox y Snell = 0.632; y R^2 de Nagelkerke= 1), indicando una buena capacidad del modelo para explicar la variabilidad en los datos y la asociación de indicadores de sustentabilidad a la variable predictora (Producción de café). Sobresaliendo significativamente la participación de mujeres en el proceso de producción ($p = 0.012$), así como el Policultivo Tradicional ($p < 0.001$), que están participando en una alta producción de café (10.75-20 Q/Ha/año).

El policultivo tradicional tuvo una producción de café mayor que el resto de los sistemas. Esto se puede explicar por las relaciones e interacciones que tienen los elementos que se encuentran en este sistema (Yunusa et al., 2020), como las variedades de café y especies vegetales de sombra que fomentan una buena salud del suelo y biodiversidad, además permite el aprovechamiento de los recursos disponibles (cómo agua, luz y nutrientes), y provee protección frente a cambios climáticos, lo que contribuye a una mayor producción de café (Adamczewska-Sowińska & Sowiński, 2020).

Tabla 17. Resultados de Tablas Cruzadas y Regresión Logística Binaria

Variables	Categoría	Monocultivo Bajo Sombra	Monocultivo Bajo Sol	Policultivo Tradicional	Policultivo Comercial	Rusticano	Valor p
							Frecuencia
Producción	Baja	3	3	0	3	3	0.005
	Alta	0	0	3	0	0	
Ingreso neto anual	≤ \$5,000	0	1	0	0	0	0.002
	\$5001-\$15000	3	1	0	0	0	
	\$15001-\$25000	0	1	0	0	0	
	\$25001-\$4000	0	0	0	3	0	
	> \$40001	0	0	3	0	3	
Edad de la planta	≥10 años	2	0	2	1	0	0.192
	8-9 años	1	0	0	1	0	
	6-7 años	0	0	0	1	0	
	4-5 años	0	0	0	0	1	
	<4 años	0	3	1	0	2	
Variedades de café	1 variedad	0	1	0	3	1	0.369
	2 variedades	1	0	1	0	1	
	3 variedades	1	1	2	0	1	
	4 variedades	1	1	0	0	0	
No. de especies de plantas de sombra	Ningunos	0	3	0	0	0	0.003
	8--10	2	0	3	2	0	
	≥11	1	0	0	1	3	
No. de especies de plantas comerciales	Ninguno	0	3	0	0	2	0.021
	1--3	2	0	2	0	1	
	4--6	1	0	1	3	0	
Incidencia de plagas y enfermedades	≥ 20%	2	1	2	1	2	0.879
	15.1-20%	1	1	1	1	1	
	≤ 15%	0	1	0	1	0	
Diversidad Microbiológica	0.2000-0.2100	0	3	3	3	0	0.333
	0.2101-0.2200	3	0	0	0	0	
	0.2201-0.2300	0	0	0	0	3	
	0 - 4	0	3	1	3	0	

Nutrición del café	5 – 8	3	0	2	0	3	
Uso de métodos de conservación del suelo	Ninguno	2	0	0	0	0	0.301
	1 método	1	0	2	1	1	
	2 métodos	0	2	1	1	1	
	3 métodos	0	1	0	1	1	
Salud del suelo	0 – 5	0	0	0	1	0	0.046
	6 – 10	0	3	3	2	1	
	11—15	3	0	0	0	2	
Nivel de escolaridad	Primaria	1	2	0	1	0	0.118
	Secundaria	1	1	1	2	0	
	Preparatoria	1	0	2	0	0	
	Licenciatura	0	0	0	0	1	
	Posgrado	0	0	0	0	2	
No. de servicios básicos	2 servicios	0	1	0	0	0	0.616
	3 servicios	0	1	0	0	0	
	4 servicios	1	1	1	1	1	
	5 servicios	2	0	2	2	2	
No. de años produciendo café	≤ 14 años	3	0	3	0	1	0.011
	15-29 años	0	1	0	0	2	
	≥ 30 años	0	2	0	3	0	
Superficie cultivada	≤ 2 ha	3	1	3	1	3	0.151
	≥ 2.1 ha	0	2	0	2	0	
Ingresos de Otras Fuentes	Sí	1	1	0	1	2	0.558
	No	2	2	3	2	1	
No. de mujeres que participan en el proceso de producción	Ninguna	0	0	2	0	0	0.009
	1 – 6	3	2	1	0	3	
	7 – 12	0	1	0	3	0	

5.9 MONOCULTIVO BAJO SOL

El sistema de monocultivo bajo sol tuvo una producción de 8.5 Q/ha/año, representando 64% del valor óptimo. El ingreso neto fue de \$21,993.75 al año, siendo apenas 35% del valor máximo posible. La edad de la planta, de acuerdo con la escala, se encuentra en 100%, indicando que tiene el valor óptimo para este indicador, lo que también se presenta en el número de variedades de café. No presenta especies de sombra, por lo que tuvo 0% para otras especies vegetales. Además, al ser un monocultivo tuvo un valor de 0% en el indicador de policultivo. La incidencia de plagas y enfermedades, de acuerdo con la escala, obtuvo un valor de 40% en referencia con el valor óptimo. En el índice de Margalef obtuvo un valor de 0.2036, que representa un 89% del valor máximo posible. En la nutrición del cafeto obtuvo un valor de 0 en la escala, equivalente a 0% en referencia con el valor óptimo. Obtuvo un porcentaje del 100% para el uso de métodos de conservación del suelo ya que aplica 3. Para salud del suelo, de acuerdo con la escala obtuvo un valor de 7, equivalente a 47% del valor óptimo. La escala para el uso de fertilizantes y plaguicidas obtuvo un valor de 80%. Para escolaridad tuvo un porcentaje de 33%, acceso a servicios básicos y permanencia de los productores en el sistema de 60%. Para superficie por sistema, ingresos de otras fuentes, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones obtuvo 100% (Figura 38).

Los puntos críticos, o aspectos que se pueden mejorar del sistema (con valores menores a 75%) fueron producción, ingreso neto, otras especies vegetales, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del cafeto, salud del suelo, escolaridad, acceso a servicios básicos y permanencia de los productores en el sistema.

Por otro lado, las bondades o indicadores con valores por encima del 75% de Monocultivo Bajo Sol fueron edad de la planta, variedades de café, diversidad microbiológica, uso de métodos de conservación del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

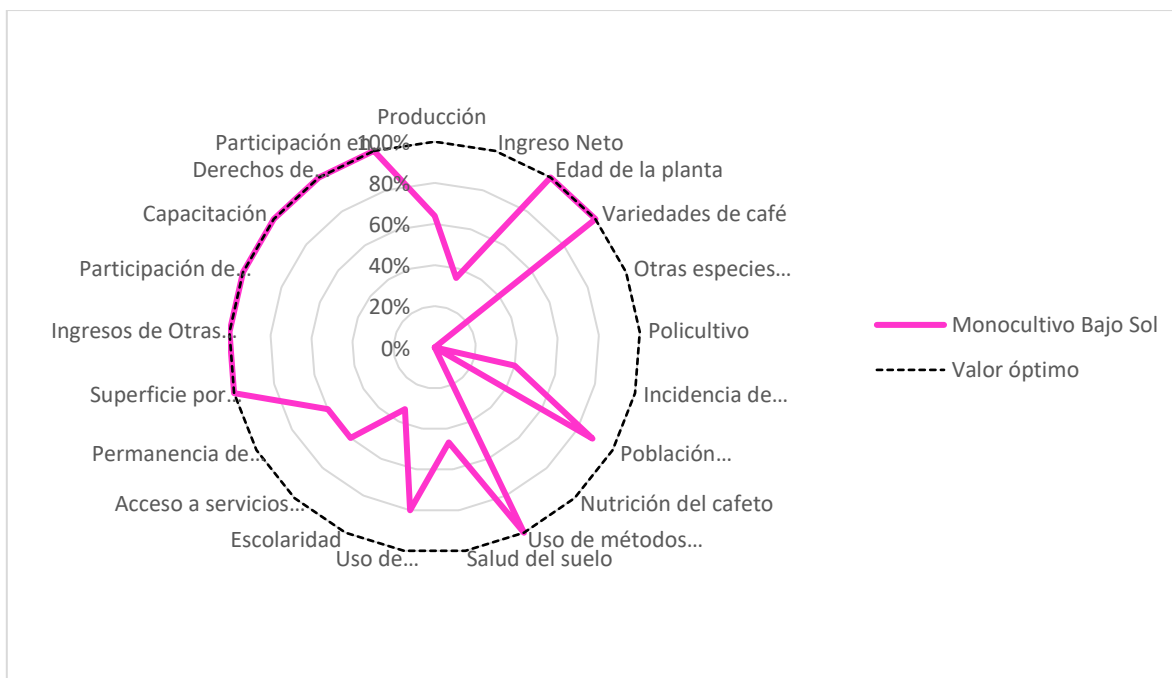


Figura 38. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Monocultivo Bajo Sol

5.10 POLICULTIVO COMERCIAL

El sistema de policultivo comercial tuvo un 40% de producción respecto al valor óptimo, y 47% para ingreso neto. La edad de la planta, dentro de la escala se encuentra en nivel 5, lo que equivale al 100%. Este sistema tiene 1 variedad de café por parcela, por lo que representa 25% del total, tiene 83% con otras especies vegetales y se comercializan 6 especies de estas (100% para policultivo). En la incidencia de plagas y enfermedades obtuvo un valor de 1, equivalente al 20%. El índice de Margalef representa el 90% del valor óptimo. La nutrición del cafeto obtuvo 38% de acuerdo con la escala y salud del suelo 40%. En métodos de conservación del suelo aplican 2 (67%). En uso de fertilizantes y plaguicidas obtuvo un valor de 4, equivalente al 80%. La escolaridad representa 17% y en superficie por sistema 39% del valor óptimo. Para los indicadores de acceso a servicios básicos, permanencia de los productores en el sistema, ingresos de otras fuentes, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones obtuvo 100% (Figura 39).

Los indicadores en que este sistema puede aplicar acciones de mejora, o aquellos con un porcentaje menor a 75% fueron producción, ingreso neto, variedades de café, incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del cafeto, uso de métodos de conservación del suelo, salud del suelo, escolaridad, superficie por sistema e ingresos de otras fuentes.

Los indicadores considerados como fortalezas del sistema (mayores a 75%) fueron edad de la planta, otras especies vegetales, policultivo, diversidad microbológica, uso de fertilizantes

y plaguicidas, acceso a servicios básicos, permanencia de los productores en el sistema, participación de las mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

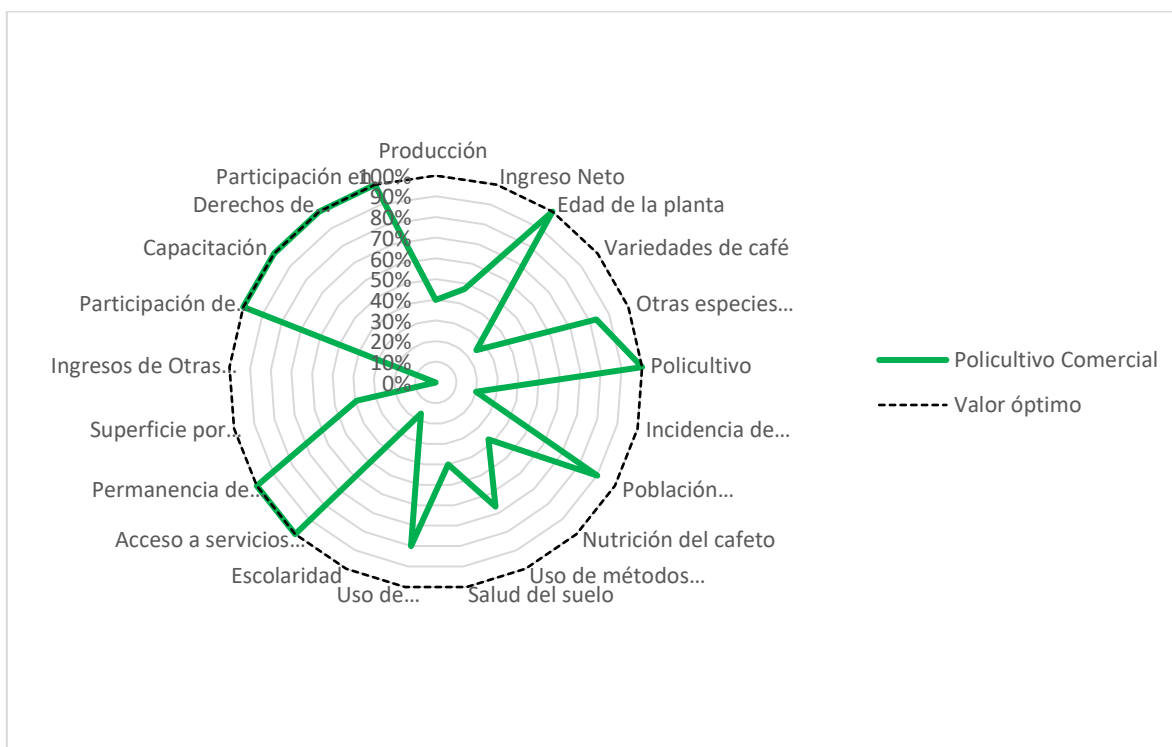


Figura 39. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Policultivo Comercial

5.11 POLICULTIVO TRADICIONAL

El sistema de Policultivo Tradicional tiene una producción de 13.3 Q/ha/año y un ingreso neto anual de \$ 62,213.58, representando el 100% del valor óptimo para ambos indicadores. La edad de la planta tuvo un valor de 5 en la escala y porcentaje del 100%. Cultivan 3 variedades de café (75%), 10 especies vegetales para sombra (83%) y como policultivo 5 especies (83%). La escala de incidencia de plagas y enfermedades representa el 20% del valor óptimo. Para diversidad microbiológica (índice de Margalef) se obtuvo un valor de 0.2048, equivalente a 89%. En este sistema se aplican 2 métodos de conservación del suelo, es decir, 67% del valor óptimo. La escala de nutrición del cafeto obtuvo un nivel de 5 (63%), salud del suelo 9 (60%) y uso de fertilizantes y plaguicidas 4 (80%). Para escolaridad, obtuvo un porcentaje de 50%, permanencia de los productores en el sistema 20% y superficie por sistema 21%. Los indicadores de acceso a servicios básicos, ingresos de otras fuentes, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones tienen el valor óptimo o 100% (Figura 40).

Es necesario considerar aplicar medidas correctivas en los siguientes indicadores: Incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del cafeto, uso de métodos de conservación del suelo, salud del suelo, escolaridad, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes y participación de mujeres en el proceso de producción.

Los indicadores que obtuvieron porcentajes cerca del valor óptimo fueron producción, ingreso neto, edad de la planta, variedades de café, otras especies vegetales, policultivo, diversidad microbiológica, uso de fertilizantes y plaguicidas, acceso a servicios básicos, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

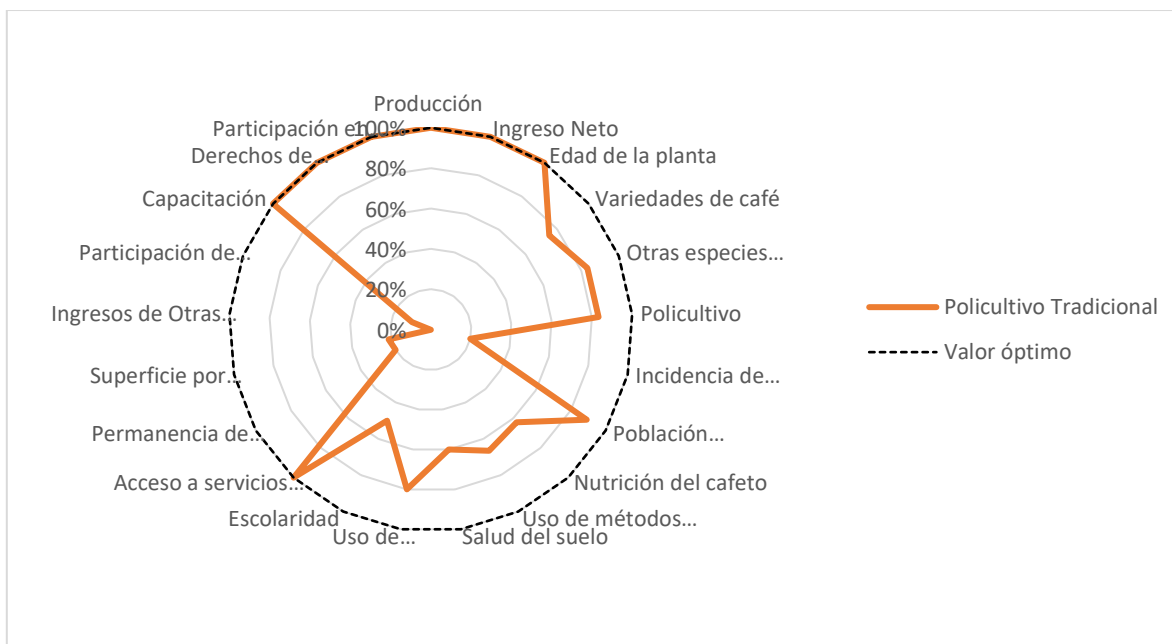


Figura 40. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Policultivo Tradicional

5.12 MONOCULTIVO BAJO SOMBRA

La producción del sistema de Monocultivo Bajo Sombra fue de 4 Q/ha/año, con un ingreso neto de \$13,800.00, equivalente al 22% del valor óptimo. La edad de la planta tuvo un nivel de 1 en la escala (20%) y en este sistema se cultivan 3 variedades de café (75%), 10 especies vegetales de sombra (83%) y no presentan policultivo (0%) porque no se comercializan otras especies vegetales. La escala de incidencia de plagas y enfermedades indica un 20% del valor óptimo. Para diversidad microbiológica, el índice de Margalef fue de 0.2116 (92%), para nutrición del cafeto un valor de 7 (88%) y salud del suelo un valor de 15 (100%). No utilizan métodos de conservación del suelo, por lo que se obtuvo un porcentaje de 0% y el valor en la escala de uso de fertilizantes y plaguicidas fue 4 (80%). En escolaridad obtuvo 33%. La permanencia de los productores en el sistema fue 20%, ya que llevan 10 años produciendo café y tienen una superficie por sistema de 0.5 ha (7%). Participan 2 mujeres en el proceso de producción, equivalente a 20% y no tienen ingresos de otras fuentes por lo que reciben un valor de 0% para este indicador. Presenta un valor de 100% para acceso a servicios básicos, capacitación derechos de propiedad y participación en toma de decisiones (Figura 41).

Los indicadores con porcentajes menores a 75% fueron producción, ingreso neto, edad de la planta, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, uso de métodos de conservación

del suelo, escolaridad, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes y participación de mujeres en el proceso de producción.

Mientras que los indicadores con porcentajes por arriba del 75% fueron variedades de café, otras especies vegetales, diversidad microbiológica, nutrición del cafeto, salud del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, acceso a servicios básicos, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

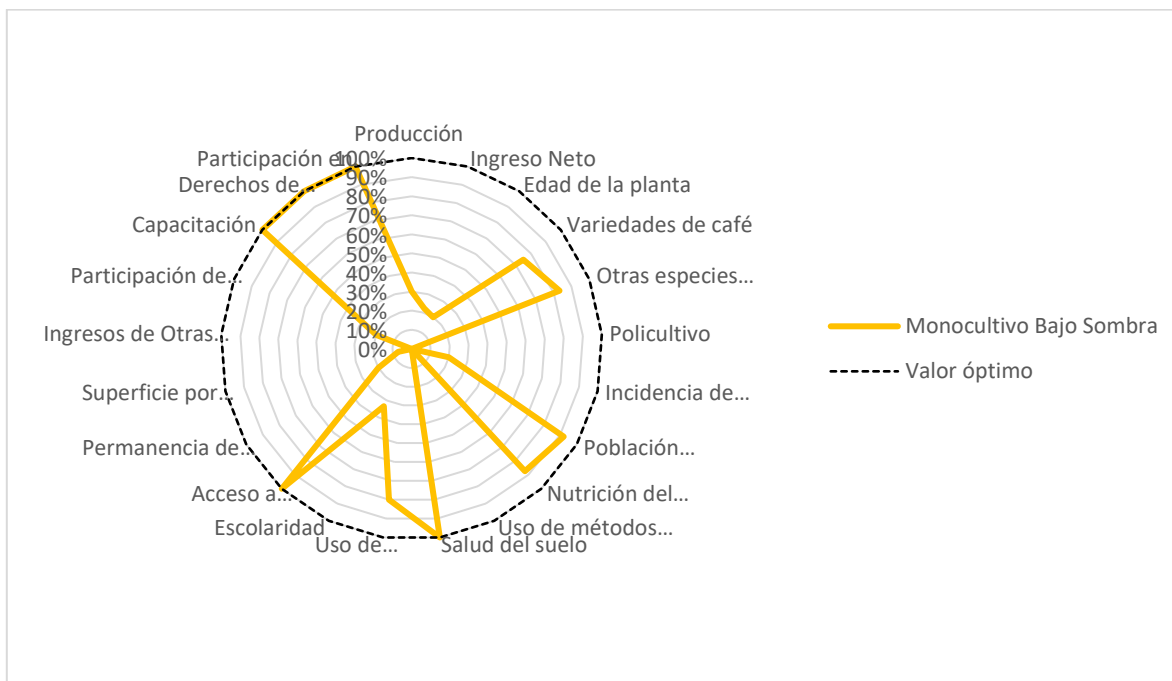


Figura 41. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Monocultivo Bajo Sombra

5.13 RUSTICANO

El sistema Rusticano tuvo una producción de 7 Q/ha/año (53%) y un ingreso neto de \$51,800.00 (83%). La escala para variedad de la planta fue 5, equivalente al 100%. Cultivan 2 variedades de café (50%), 12 especies vegetales de sombra (100%), y no presentan policultivo (0%). Para incidencia de plagas y enfermedades obtuvo 1 en la escala, equivalente al 20%. En el índice de Margalef fue de 0.2298, equivalente al 100%, la nutrición del cafeto fue 8 en la escala utilizada (100%) y en salud del suelo fue 12 (80%). Aplican dos métodos de conservación del suelo (67%) y en la escala de fertilizantes y plaguicidas el valor obtenido fue 4 (80%). En escolaridad tuvo un porcentaje de 83%, permanencia de los productores en el sistema 30%, al llevar 15 años produciendo café. La parcela tiene una extensión de 1 ha, equivalente a 14% y participan 3 mujeres en el proceso de producción (30%). Los indicadores de acceso a servicios básicos, ingresos de otras fuentes, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones obtuvieron el valor óptimo (100%) (Figura 42).

Los indicadores en los que se debe considerar aplicar una mejora para el sistema rusticano fueron producción, variedades de café, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, uso

de métodos de conservación del suelo, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema y participación de mujeres en el proceso de producción.

Por el contrario, los indicadores por arriba del 75% fueron ingreso neto, edad de la planta, otras especies vegetales, diversidad microbiológica, nutrición del cafeto, salud del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, escolaridad, acceso a servicios básicos, ingreso de otras fuentes, capacitación y derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

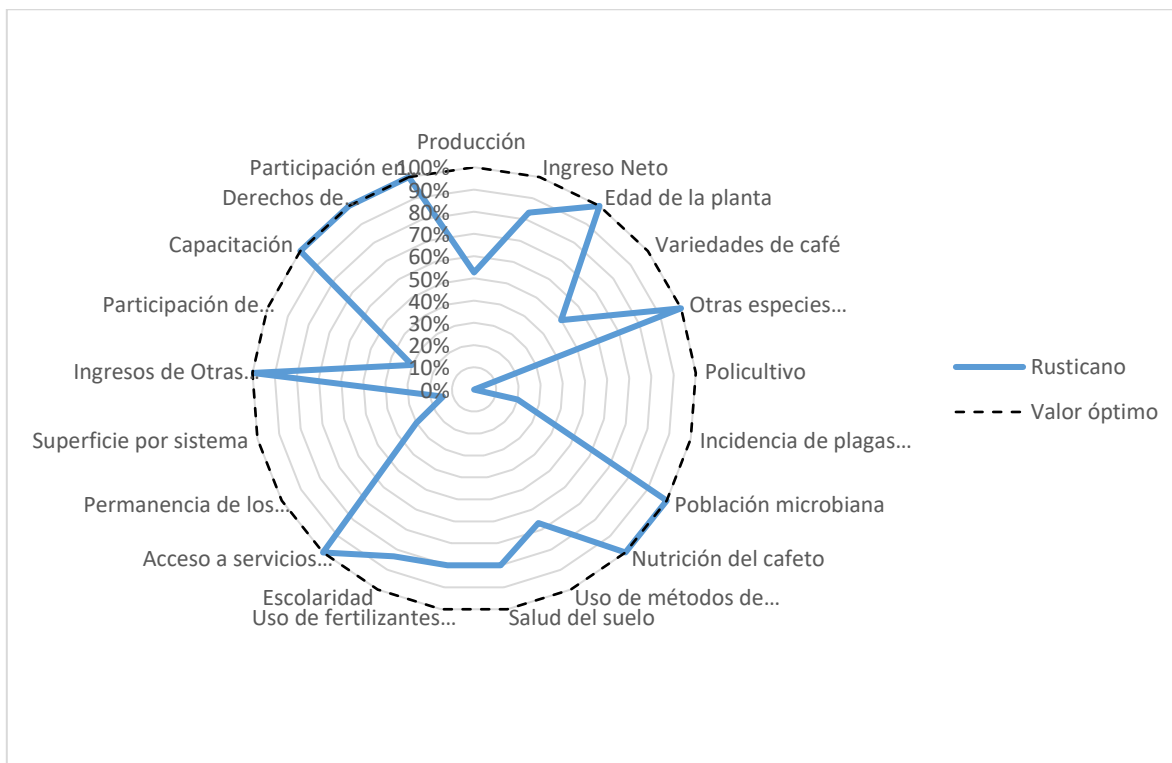


Figura 42. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de Rusticano

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

6.1 DIMENSIÓN AMBIENTAL

En el análisis de la dimensión ambiental (Figura 43) destacó el sistema Rusticano, por tener los valores óptimos para otras especies vegetales, población microbiana y nutrición del cafeto, además de tener porcentajes altos (mayores a 75%) para salud del suelo y uso de fertilizantes y plaguicidas, cabe destacar que no presenta ningún indicador con un valor de 0%, lo que indica que este sistema mantiene un equilibrio adecuado en los diferentes indicadores de la dimensión ambiental. Esto se puede atribuir a la característica agroforestal del sistema, que al ser menos intensivo fomenta un entorno más saludable y biodiverso (Ruiz García et al., 2020). Es un sistema con una alteración mínima o nula del estrato vegetal original, por lo que presenta mayor número de especies de sombra, y los porcentajes altos para población microbiana del suelo, salud del suelo y nutrición del cafeto se encuentran

relacionados con la mínima intervención del área, con deforestación menor y mayor diversidad vegetal (Escamilla & Díaz, 2002). Mientras que, en salud del suelo, destacó monocultivo bajo sombra con el porcentaje más alto, seguido de Rusticano,

Sin embargo, para variedades de café y uso de métodos de conservación del suelo, Monocultivo Bajo Sol tuvo el porcentaje óptimo, al ser un sistema más intensivo, requiere de la implementación de un mayor número de métodos de conservación del suelo para asegurar su producción y en contraste, el sistema Rusticano no necesita aplicar tantos métodos de conservación, ya que protege naturalmente al suelo de la erosión.(Escamilla & Díaz, 2002). Para incidencia de plagas y enfermedades también tuvo un porcentaje óptimo ya que, al ser un sistema a plena exposición solar del cafeto, la presencia de roya se ve disminuida (De Melo Virginio Filho & Astorga Domian, 2015).

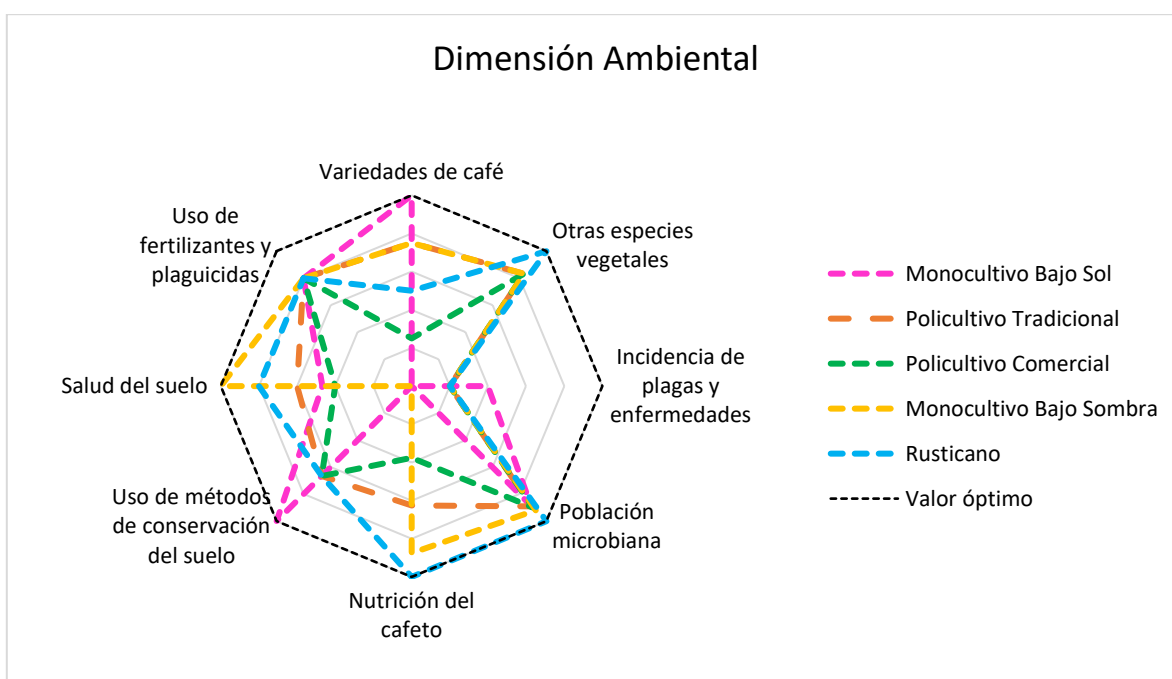


Figura 43. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Ambiental

6.2 DIMENSIÓN SOCIAL

En la dimensión social destacó el sistema de Policultivo Comercial, ya que obtuvo porcentajes con el valor óptimo (100%) para acceso a servicios básicos, permanencia de los productores en el sistema, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación y participación en toma de decisiones (Figura 44).

Todos los sistemas, a excepción de Monocultivo Bajo Sol, completó a los servicios básicos en sus sistemas, indicador que refleja una buena calidad de vida para los productores. El Policultivo Comercial, junto con Monocultivo Bajo Sol y Policultivo Tradicional tuvieron una alta participación de mujeres, lo cual es relevante ya que indica un avance hacia la equidad de género en la producción de café. El valor más alto para escolaridad fue para

Rusticano, debido a que los productores de este sistema tienen un nivel educativo de licenciatura y maestría, lo que ha influido en los conocimientos que se aplican sobre diferentes aspectos del manejo.

Los productores consideran el cultivo de café como práctica complementaria, mientras que diversifican sus fuentes de ingresos para asegurar su estabilidad económica. Esta diversificación es posible porque cuentan con una educación que les permite explorar y gestionar otras oportunidades económicas, manteniendo la producción de café como tradición familiar (Anderzén et al., 2020).

Es importante destacar que los indicadores de capacitación y participación en toma de decisiones tienen los mismos valores en todos los sistemas, debido a que todos los miembros de la cooperativa reciben las mismas capacitaciones y tienen una participación equitativa en la toma de decisiones de la cooperativa. Además, que tienen el compromiso de asistir a las reuniones para poder ser miembros de la asociación. Este tipo de organización es importante en el caso de los pequeños productores, pues les otorga beneficios como consecuencia del agrupamiento, reducen costos y les da la oportunidad de tener ganancias económicas significativas y comercio justo (Ruiz García et al., 2020).

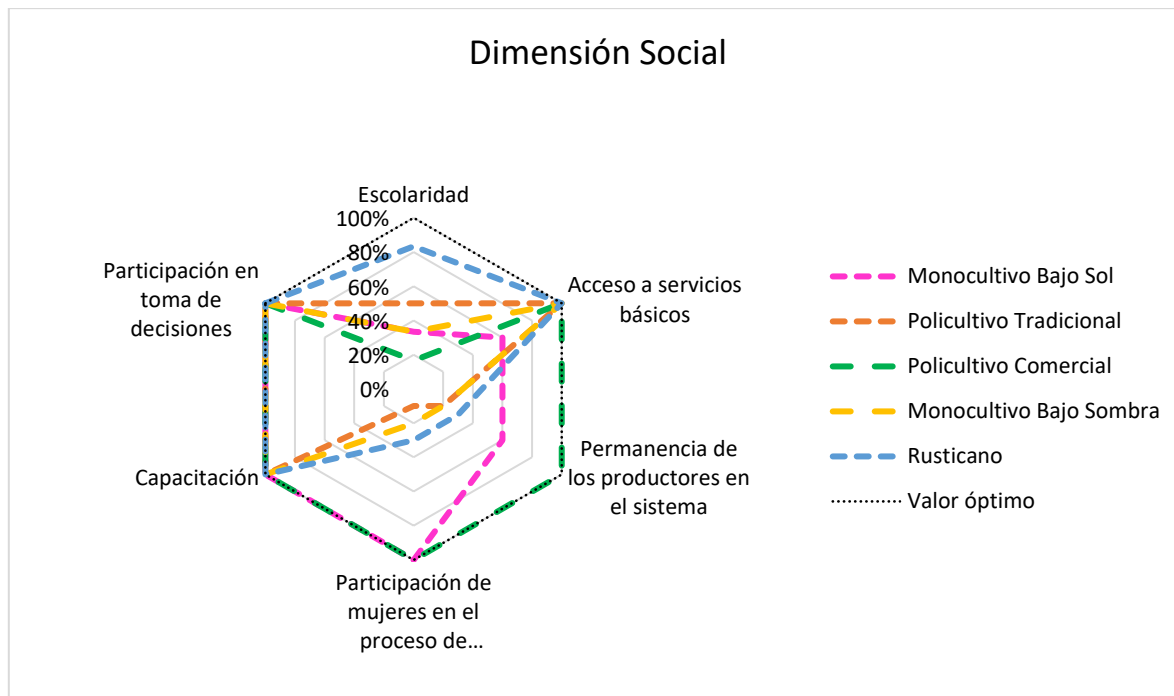


Figura 44. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Social

6.3 DIMENSIÓN ECONÓMICA

El sistema de Policultivo Tradicional destacó en la dimensión económica por tener valor de 100% para producción, ingreso neto, edad de la planta y derechos de propiedad, además de un valor alto para policultivo (Figura 45). Estos resultados indican que el sistema puede ser un modelo altamente sustentable desde el punto de vista económico. La producción alta y el

ingreso neto reflejan su eficacia para incrementar rendimientos y proporcionar a los productores una fuente de ingresos segura. La edad de las plantas en este sistema, así como para Monocultivo Bajo Sol, Policultivo Comercial y Rusticano es adecuada, ya que se encuentran en su máximo potencial productivo (Farfán-V., 2014).

Por otro lado, Policultivo Comercial obtuvo el porcentaje más alto para policultivo, lo que refleja la diversificación, así como la integración eficiente de diferentes cultivos dentro del sistema (Escamilla & Díaz, 2002). Esta diversificación además de contribuir a la dimensión ambiental (biodiversidad), es importante para la resiliencia económica, pues les permite a los productores tener varias fuentes de ingreso, disminuyendo el riesgo asociado con la dependencia de un solo cultivo (Pronti & Coccia, 2021).

El sistema de Monocultivo Bajo Sol tuvo el porcentaje más alto de superficie cultivada, debido a que es un modelo agrícola extensivo, sin embargo, presentó un porcentaje bajo de producción. Lo cual crea la necesidad de buscar ingresos de otras fuentes, al igual que el sistema Rusticano. Estos dos sistemas buscan maneras de complementar sus ingresos con actividades adicionales, siendo una estrategia efectiva para mitigar los riesgos económicos asociados con la dependencia exclusiva del cultivo de café (Gerlicz et al., 2019).

Los derechos de propiedad, para este y el resto de los sistemas alcanzaron el 100%, indicando que existe seguridad en la tenencia de la tierra, siendo importante para la estabilidad económica a largo plazo de los productores y puede asegurar la soberanía alimentaria (Guzmán Luna et al., 2022).

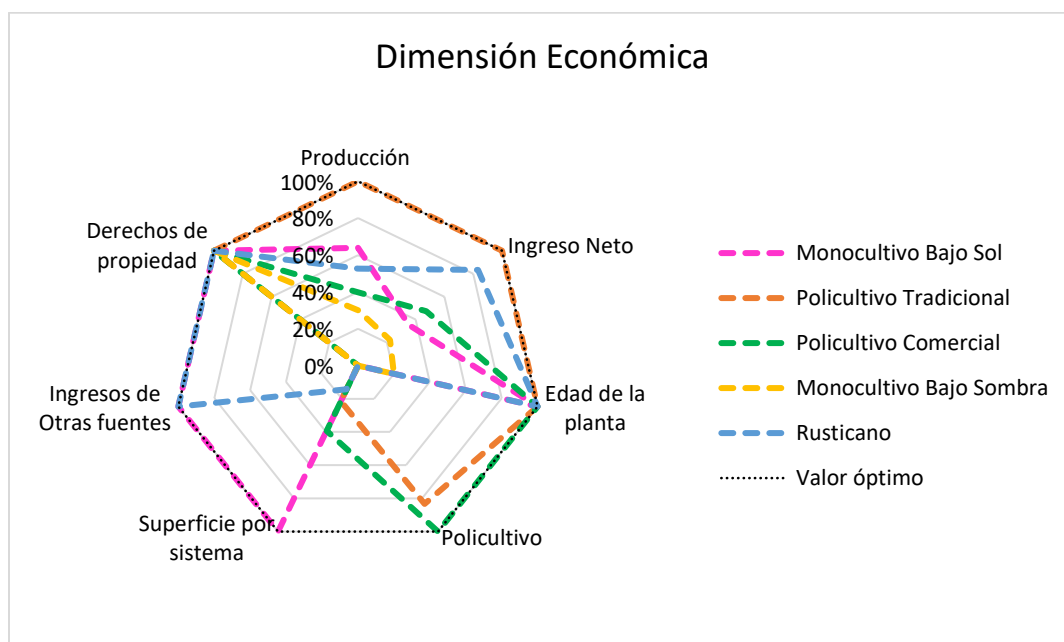


Figura 45. Diagrama AMIBA para comparación de indicadores de la Dimensión Económica

CONCLUSIONES

El estudio analizó la sustentabilidad de cinco métodos de cultivo de café en Cuetzalan del Progreso, Puebla utilizando la metodología MESMIS, la cual permitió el análisis y comparación de diferentes indicadores de sustentabilidad que cubrieran las dimensiones social, ambiental y económica, permitiendo cumplir con los objetivos generales y específicos planteados en esta investigación.

Se determinó el estado de la salud de los cafetales por medio del balance nutricional de la relación microbiota-suelo-planta, donde destacó el sistema Rusticano, por la diversidad microbiológica, nutrición del café y salud del suelo.

Se relacionó la rentabilidad de los cafetales con la satisfacción de las necesidades básicas de los productores, donde destacó el sistema de Policultivo Tradicional, porque obtuvo los valores más elevados en los indicadores de producción de café e ingreso neto, además de que sus productores tienen acceso a todos los servicios básicos en sus viviendas.

Se midió el grado de sustentabilidad de los sistemas cafetaleros con la metodología MESMIS:

- Para el sistema de Monocultivo Bajo Sol se encontró que los puntos del sistema que se deben mejorar fueron producción, ingreso neto, otras especies vegetales, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del café, salud del suelo, escolaridad, acceso a servicios básicos y permanencia de los productores en el sistema. Mientras que las bondades fueron edad de la planta, variedades de café, diversidad microbiológica, uso de métodos de conservación del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes, participación de mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.
- En Policultivo Comercial se encontraron como puntos críticos producción, ingreso neto, variedades de café, incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del café, uso de métodos de conservación del suelo, salud del suelo, escolaridad, superficie por sistema e ingresos de otras fuentes. Y sus fortalezas fueron edad de la planta, otras especies vegetales, policultivo, diversidad microbiológica, uso de fertilizantes y plaguicidas, acceso a servicios básicos, permanencia de los productores en el sistema, participación de las mujeres en el proceso de producción, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.
- Para Policultivo Tradicional es necesario aplicar medidas correctivas en incidencia de plagas y enfermedades, nutrición del café, uso de métodos de conservación del suelo, salud del suelo, escolaridad, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes y participación de mujeres en el proceso de producción. Los indicadores que se consideran como bondades fueron producción, ingreso neto, edad de la planta, variedades de café, otras especies vegetales, policultivo, diversidad microbiológica, uso de fertilizantes y plaguicidas,

acceso a servicios básicos, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

- En Monocultivo Bajo Sombra los puntos críticos fueron producción, ingreso neto, edad de la planta, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, uso de métodos de conservación del suelo, escolaridad, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema, ingresos de otras fuentes y participación de mujeres en el proceso de producción. Mientras que las fortalezas fueron variedades de café, otras especies vegetales, diversidad microbiológica, nutrición del cafeto, salud del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, acceso a servicios básicos, capacitación, derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.
- En el sistema Rusticano se identificaron como puntos críticos producción, variedades de café, policultivo, incidencia de plagas y enfermedades, uso de métodos de conservación del suelo, permanencia de los productores en el sistema, superficie por sistema y participación de mujeres en el proceso de producción. Por el contrario, las fortalezas del sistema fueron ingreso neto, edad de la planta, otras especies vegetales, diversidad microbiológica, nutrición del cafeto, salud del suelo, uso de fertilizantes y plaguicidas, escolaridad, acceso a servicios básicos, ingreso de otras fuentes, capacitación y derechos de propiedad y participación en toma de decisiones.

Finalmente se comparó la sustentabilidad de los diferentes sistemas de manejo de cultivo de café:

- **Dimensión ambiental:** El sistema Rusticano mostró ventajas significativas en la conservación de la biodiversidad, salud del suelo y nutrición del cafeto, este sistema equilibra la producción con la preservación del entorno natural, lo que es crucial para la sostenibilidad a largo plazo.
- **Dimensión Social:** Policultivo Comercial sobresalió en aspectos como la participación de las mujeres y la mejora de la calidad de vida de los productores. Sin embargo, Rusticano destacó en el nivel de escolaridad, y también el acceso a servicios básicos.
- **Dimensión Económica:** El Policultivo Tradicional destacó alcanzando valores óptimos en producción, ingreso neto, edad de la planta y derechos de propiedad, teniendo un rendimiento económico sobresaliente, con enfoque en la diversificación. Sin embargo, Rusticano también presenta valores estables para ingreso neto y diversificación de ingresos.

La información obtenida nos permite confirmar la hipótesis de la investigación, pues los cafetales de la cooperativa Taposontok que son manejados bajo el sistema Rusticano presentan una sustentabilidad mayor que el resto de los sistemas, incluyendo aquellos que se encuentran bajo sol, y fomenta el equilibrio entre las tres dimensiones.

De manera global, se observó que el sistema Rusticano tuvo un mejor desempeño al tener el mayor número de indicadores (13) arriba del 75%, indicando que no se presentan problemas y el sistema se encuentra estable. Se pudo identificar que no existe un sistema de cultivo único que sobresalga en todas las dimensiones ni en todos los indicadores de sustentabilidad, cada método presenta sus propias fortalezas y desafíos, por lo que se sugiere que exista una integración de las prácticas de los diferentes sistemas e implementar estrategias que permitan a los indicadores que se encuentran por debajo del 75% alcanzar un nivel óptimo, para poder evitar una crisis en el sistema y lograr desarrollar un modelo de producción de café que sea completamente sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, O., Serrano, E., Peña, W., Pocasangre, L., Rosales, F., Delgado, E., Trejos, J., & Alvaro, S. (2006). La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. *Banana Sustainable Business*, 222–233. <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Acu%C3%83%C2%B1a-et-al-2006.pdf>
- Adamczewska-Sowińska, K., & Sowiński, J. (2020). Polyculture Management: A Crucial System for Sustainable Agriculture Development. In *Soil Health Restoration and Management* (pp. 279–319). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_8
- Anderzén, J., Guzmán Luna, A., Luna-González, D. V., Merrill, S. C., Caswell, M., Méndez, V. E., Hernández Jonapá, R., & Mier y Terán Giménez Cacho, M. (2020). Effects of on-farm diversification strategies on smallholder coffee farmer food security and income sufficiency in Chiapas, Mexico. *Journal of Rural Studies*, 77, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.04.001>
- Arias, M. E., González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., & Ball, A. S. (2005). La salud del suelo: un nuevo reto para microbiólogos y químicos. *International Microbiology*, 8(1), 13–21. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-67092005000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Astier, M., Maser, O., & Galván-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/9788461256419.pdf
- Barchuk, A. H., Guzman, M. L., Locati, L., & Suez, L. (2020). *Manual de buenas prácticas para diseños agroecológicos*. www.bibliotecadigital.editorialbrujas.com.ar
- Bernkopfová, M. (2014). *La identidad cultural de los Nahuas de la Sierra Nororiental de Puebla y la influencia de la Unión de Cooperativas Tosepan* (1st ed.). <https://edsp.bibliotecabuap.elogim.com/eds/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fOTI4NjYwX19BTg2?sid=2985f4a7-905d-40fc-9340-2e3e74ae79d4@redis&vid=8&format=EB>
- Calvente, A. (2007). *El concepto moderno de sustentabilidad*. <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r76250.PDF>
- Chaudhari, S. K., Biswas, P. P., & Kapil, H. (2020). Soil Health and Fertility. In B. Mishra (Ed.), *Soils of India* (pp. 215–231). SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0_11

- Covre, A. M., Partelli, F. L., Bonomo, R., & Gontijo, I. (2018). Micronutrients in the fruits and leaves of irrigated and non-irrigated coffee plants. *Journal of Plant Nutrition*, *41*(9), 1119–1129. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431665>
- de Fátima Pereira Silva, P., de Resende, M. L. V., Reichel, T., de Lima Santos, M., dos Santos Botelho, D. M., Ferreira, E. B., & Freitas, N. C. (2023). Potassium Phosphite Activates Components Associated with Constitutive Defense Responses in *Coffea arabica* Cultivars. *Molecular Biotechnology*, *65*(11), 1777–1795. <https://doi.org/10.1007/s12033-023-00683-5>
- De Melo Virginio Filho, E., & Astorga Domian, C. (2015). *Prevención y control de la roya del café. Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores* (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Ed.; 1st ed.). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8186>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, *15*, 3–11. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Durán, F. (2019). *Cultivo del Café*. Grupo Latino Editores S. A. S. <https://edss.bibliotecabuap.elogim.com/eds/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzIyODQ1MjRfX0FO0?sid=ab1d5ba3-8d3b-4354-b4ae-889a898f741e@redis&vid=2&format=EB>
- Escamilla, E., & Díaz, S. (2002). *Sistemas de Cultivo de Café en México* (2nd ed.). <https://es.scribd.com/document/270035183/2-1-Sistemas-de-Cultivo-de-Cafe-en-Mexico>
- Farfán-V., F. (2014). *Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café*. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, *15*(1), 93–110. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7>
- Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*, *8*(2), 175–183. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10402108.pdf>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2022). *Panorama Agroalimentario Café 2022*. <https://www.fira.gob.mx/InvYEvalEcon/EvaluacionIF>
- Figueroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., & Godinez-Montoya, L. (2015). *La producción y el consumo del café* (M. GARCIA-MIRANDA, Ed.). www.ecorfan.org/spain

- Gerlicz, A., Méndez, V. E., Conner, D., Baker, D., & Christel, D. (2019). Use and perceptions of alternative economic activities among smallholder coffee farmers in Huehuetenango and El Quiché departments in Guatemala. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(3), 310–328. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1532480>
- Goenaga, A. (2023). *Documental Taposontok*. <https://www.youtube.com/watch?v=LtMo1hGrufc>
- Grisell-Mora-Ravelo, S., Reyes, F. G., Moreno, J. P., José, J., Cabriales, P., Tijerina-Chávez, L., & De Lourdes De La Isla De Bauer, M. (2013). Dinamic of Bacteria Desnitrificants and Nitrificants in the Rizospheric of Wheat with Slow Release of Fertilizer, Irrigated with Waste or Well Water. *Advances in Microbiology*, 03(04), 343–349. <https://doi.org/10.4236/AIM.2013.34048>
- Guerrero, J. (2020). *Impacto potencial del cambio climático sobre la producción de café en la región Mazateca de Oaxaca y región de Cuetzalan, Puebla* [Doctoral Thesis, Colegio de Postgraduados]. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/4365/Guerrero_Carrera_J_DC_EDAR_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guzmán Luna, A., Bacon, C. M., Méndez, V. E., Flores Gómez, M. E., Anderzén, J., Mier y Terán Giménez Cacho, M., Hernández Jonapá, R., Rivas, M., Duarte Canales, H. A., & Benavides González, Á. N. (2022). Toward Food Sovereignty: Transformative Agroecology and Participatory Action Research With Coffee Smallholder Cooperatives in Mexico and Nicaragua. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.810840>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Cuetzalan del Progreso Puebla*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21043.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2017*. www.inegi.org.mx
- Juárez-Sanz, M., Sánchez-Andreu, J., & Sánchez-Sánchez, A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*. <https://swebesco.bibliotecabuap.elogim.com/ehost/detail/detail?vid=2&sid=5f7cfadd-d766-4fd9-98ab-d215a4a71898%40redis&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=318168&db=e000xww>
- Kates, R., Clark, W., Corell, R., & et al. (2001). Sustainability Science. *Science*, 292(5517), 641–642. www.un.org/millennium/sg/report/

- Liang, P., Jingan, X., & Liying, S. (2022). The effects of reclaimed water irrigation on the soil characteristics and microbial populations of plant rhizosphere. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 17570–17579. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16983-9>
- Manson, R. H., Hernández-Ortiz, V., Gallina, S., & Mehlreter, K. (2008). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000046340>
- Martinez, H. E. P., Lacerda, J. S. de, Clemente, J. M., Silva Filho, J. B. da, Pedrosa, A. W., Santos, R. H. S., & Cecon, P. R. (2018). Production, chemical composition, and quality of Arabic coffee subjected to copper doses. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(4), 443–452. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000400006>
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. (2000). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: El marco de evaluación MESMIS*. https://www.researchgate.net/profile/Marta-Astier/publication/299870632_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_El_Marco_de_evaluacion_MESMIS/links/57068f7f08aea3d280211802/Sustentabilidad-y-manejo-de-recursos-naturales-El-Marco-de-evaluacion-MESMIS.pdf
- Official Journal of the Federation (DOF). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0
- ONU. (n.d.). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. Retrieved November 23, 2022, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Pankhurst, C. E., Doube, B. M., & Gupta. V. V. S. R. (1998). *Biological indicators of soil health* (C. E. Pankhurst, B. M. Doube, & V. V. S. R. Gupta, Eds.). CAB international .
- Paré, L. (1990). ¿Adelgazamiento del INMECAFE o de los pequeños productores de café? *Sociologica*, 5(13). <http://www.sociologicamexico.azc.uam.mx/index.php/Sociologica/article/view/927/899>
- Pérez-Grovas Garza, V. (2000). Evaluación de la sustentabilidad del sistema de manejo de café orgánico en la Unión de Ejidos Majomut, región de los Altos de Chiapas. In O. Masera & S. López-Riadura (Eds.), *Sustentabilidad y Sistemas Campesinos* (pp. 45–80).

- Perfecto, I., Jiménez-Soto, M. E., & Vandermeer, J. (2019). Coffee Landscapes Shaping the Anthropocene. *Current Anthropology*, 60(S20), S236–S250. <https://doi.org/10.1086/703413>
- Pronti, A., & Coccia, M. (2021). Multicriteria analysis of the sustainability performance between agroecological and conventional coffee farms in the East Region of Minas Gerais (Brazil). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(3), 299–306. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000332>
- Ramírez-Builes, V. H., & Küsters, J. (2021). Calcium and Potassium Nutrition Increases the Water Use Efficiency in Coffee: A Promising Strategy to Adapt to Climate Change. *Hydrology*, 8(2), 75. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020075>
- Ruiz García, P., Gómez Díaz, J. D., Valdes Velarde, E., & Monterroso Rivas, A. I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16(4), 137–158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>
- Sadeghian, S. (2018). *Interpretación de los resultados de análisis de suelo*. www.cenicafe.org
- Sadeghian, S. (2022). Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo. In *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Sadeghian-Khalajabadi, S., & Salamanca-Jiménez, A. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafé*, 66(2), 73–87. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/656>
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf
- Scalco, M. S., Alvarenga, L. A., Guimarães, R. J., Dominghetti, A. W., Colombo, A., Assis, G. A., & Abreu, G. F. (2014). Teores foliares de fósforo e zinco, produtividade e crescimento de café irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(2), 95–101. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000200003>
- Solórzano, N. (2019). Nutrición Mineral en el Cultivo de Café [Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. In *Exploraciones, intercambios y relaciones entre el diseño y la tecnología*. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Toledo, V. M., & Moguel, P. (1996). El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias*, 043. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/11519>
- Toledo, V., & Moguel, P. (1999). Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología Política*, 18, 23–36.

- Toro, P., García, A., Gómez-Castro, A. G., Perea, J., Acero, R., & Rodríguez-Estévez, V. (2010). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas. *Archivos de Zootecnia*, 59(232), 71–94. <https://doi.org/10.21071/AZ.V59I232.4908>
- Wang, F., Chen, S., Wang, Y., Zhang, Y., Hu, C., & Liu, B. (2018). Long-Term Nitrogen Fertilization Elevates the Activity and Abundance of Nitrifying and Denitrifying Microbial Communities in an Upland Soil: Implications for Nitrogen Loss From Intensive Agricultural Systems. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02424>
- Yunusa, I. A. M., Kukhang, T. I. D., Powell, K. S., & Holzapfel, B. P. (2020). Canopy management for optimizing productivity of polyculture coffee production system. *Acta Horticulturae*, 1281, 257–264. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.35>

ANEXOS

ANEXO 1. Caracterización del sistema

No. De Muestra	Fecha
Nombre del productor	
Localidad	
Junta Auxiliar	
Coordenadas	
Condiciones climáticas	
Extensión del terreno	
Inclinación	
Variedades de café	
Edad de las plantas	
Renovación de cultivo	
Rotación de cultivo	
Presencia de sombra	
Especies de sombra	
Especies productivas	
Materia orgánica	
Humedad	
Poda	
Deficiencia de nutrientes	
Fertilizante	
Frecuencia de aplicación de fertilizante	
Última fecha de aplicación de fertilizante	
Presencia de plagas o enfermedades	
Tratamiento	
Fecha de floración	
Fecha de cosecha	
Otras observaciones	

ANEXO 2.

Tabla 18. Población de bacterias, hongos y actinomicetos por manejo. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0.05$)

Manejo	Monocultivo o bajo sol	Policultivo tradicional	Policultivo comercial	Monocultivo bajo sombra	Rusticano
Bacterias totales (Cel/g) x 10⁶	2.456 ± 0.07 E	22.561 ± 0.24 C	19.604 ± 0.31 D	27.59 ± 0.34 B	30.16 ± 0.08 A
Actinomicetos (UFC/g) x 10⁶	0.346±0.05 B	0.396 ± 0.01 B	0.229±0.03 C	0.377±0.02 B	0.825±0.07 A
Hongos (UFC/g) x 10⁶	0.281 ± 0.00 C	0.396 ± 0.01 B	0.047 ± 0.00 D	0.264 ± 0.03 C	0.592 ± 0.03 A
Población Bacterias nitrificantes (cel/g) x 10⁶	336.54 ± 30.0 A	279.449 ± 31.88 B	226.73 ± 12.57 B	133.121 ± 5.72 C	1.507 ± 0.05 D
Tasa de nitrificación (mg/g) por día	0.506 ± 0.01 A	0.265 ± 0.03 B	0.157 ± 0.01 C	0.078 ± 0.00 D	0.051 ± 0.01 D
Población Bacterias desnitrificantes (cel/g) x10⁶	0.031 ± 0.00 A	0.024 ± 0.00 B	0.023 ± 0.00 B	0.02 ± 0.00 B	0.011 ± 0.00 C
Tasa de transformación (NO₃-N) (mg/g por día)	9.435 ± 0.02 A	8.926 ± 0.19 B	7.694 ± 0.26 C	1.494 ± 0.23 D	-0.902 ± 0.09 E

ANEXO 3. Entrevista al representante de la cooperativa para indicadores socioeconómicos

DE LA COOPERATIVA

1. ¿En qué temas se han capacitado los integrantes?
2. ¿De quienes reciben la capacitación?
3. ¿Se capacitan a todos los integrantes?
4. ¿Con qué frecuencia reciben las capacitaciones?
5. ¿A qué pueblos originarios pertenecen?
6. ¿Cuántas personas de la cooperativa pertenecen?
7. ¿Qué porcentaje habla el idioma original?
8. ¿Qué rituales realiza para tener buenas cosechas?
9. ¿Transmite sus conocimientos y saberes a generaciones más jóvenes?
10. ¿Quiénes participan en la toma de decisiones grupales?
11. ¿Qué criterios utilizan para la toma de decisiones?
12. ¿Con qué frecuencia se reúnen los miembros de la cooperativa?
13. ¿Qué temas tratan en las reuniones?
14. ¿Qué festejos que realizan como cooperativa (aniversario, feria, fiestas patronales)?

ANEXO 5. Entrevista a los integrantes de la cooperativa para los indicadores socioeconómicos

Nombre:

Fecha:

Edad:

Género: (M) (F)

Preguntas

- **DE LOS PRODUCTORES**

1. ¿Cuál es su último grado de estudios?
2. ¿Las tierras que trabajan son propias o ejidales?
3. ¿A qué distancia se encuentra la parcela de su vivienda?
4. ¿Cuánto tiempo tarda en trasladarse a la parcela?
5. ¿Cómo se traslada a la parcela?
6. ¿Qué tan accesible es el camino? (Tipo de carretera, caminos, etc).
7. ¿Cuánto tiempo llevan produciendo café?
8. ¿Por qué siguen cultivando el café?
9. En un futuro, ¿quién va a trabajar sus parcelas?
10. ¿Alguno de los miembros de su familia ha emigrado de la ciudad?
11. En caso afirmativo, ¿podría proporcionar información sobre la cantidad de personas y las razones principales de la emigración?
12. ¿Qué servicios tienen en sus viviendas (agua potable, electricidad, servicios sanitarios (drenaje))?
13. ¿Tiene acceso a servicios de salud y educación?
14. ¿A qué distancia se encuentran los centros de salud más cercanos?
15. ¿A qué distancia se encuentran los centros escolares más cercanos?

- **PRODUCCIÓN Y VENTA DE CAFÉ**

16. ¿Cuál es la producción anual de café por hectárea o parcela?
 - a. ¿Cuál es el tamaño de su parcela?
17. ¿Cómo adquieren las plantas del café?
18. ¿Qué criterios utilizan para seleccionar la variedad que cultivan?
19. ¿Cuál es el ingreso promedio por la venta de café por hectárea o parcela?
20. ¿Qué porcentaje se destina al pago de impuestos?
21. ¿A quién venden el café?
22. ¿En qué forma lo venden (café cereza, pergamino, tostado)?
23. ¿Cuál es el precio por kg o por unidad de venta?
24. ¿Cuál es la forma de hacérselo llegar al comprador?
25. ¿Realizan todo el trabajo familiar o contratan trabajadores jornaleros?
26. En caso de contratar trabajadores, ¿Para qué actividades los contratan?
27. ¿Cuánto gastan en mano de obra?

28. ¿Ha experimentado cambios para conseguir esta mano de obra en relación con periodos anteriores?
 29. ¿Cuántas mujeres participan en el proceso de producción?
 30. ¿Aplican medidas de conservación del suelo?
 31. ¿Cuáles? (Terrazas, curvas de nivel)
 32. ¿Ha implementado estrategias o prácticas en su cultivo para adaptarse a las variaciones del clima?
 33. ¿Cuántas floraciones se presentan al año?
 34. ¿En qué mes se presentan las floraciones?
 35. ¿Cuántos cortes hacen del café cereza al año?
- **USO DE AGROQUÍMICOS**
 36. ¿Qué enfermedades o plagas afectan las plantas de café?
 37. ¿Cuántas plantas se ven afectadas?
 38. ¿En qué temporada del año son más susceptibles de plagas y enfermedades?
 39. ¿Qué tipo de tratamiento utilizan?
 40. ¿Cómo lo adquieren?
 41. ¿Con que frecuencia realizan la aplicación?
 42. ¿Utiliza fertilizantes?
 43. De ser así, ¿Cuál es el nombre o composición de los fertilizantes que aplica?
 44. ¿Con que frecuencia realizan la aplicación?
 45. ¿Cómo adquieren los fertilizantes?
 46. ¿Se realiza análisis de suelo previo a la aplicación?
 47. ¿Aplican encalado o cal dolomita?
 - **INVERSIÓN Y COSTOS DE PRODUCCIÓN**
 48. ¿Cuáles son los principales costos de producción?
 49. ¿Cuánto invierten en la producción (incluyendo fertilizantes, pesticidas, plantas de café y otros insumos)?
 50. ¿Cubren la inversión con capital propio de entidades financieras?
 51. ¿Tienen acceso a créditos, seguros o préstamos?
 52. ¿Quiénes son los proveedores de estos servicios? (Gobierno, otras entidades privadas)
 53. ¿Qué porcentaje cubren del gasto total?
 - **INGRESOS EXTRA**
 54. ¿Tiene otros cultivos además del café (policultivo)?
 55. En caso afirmativo ¿Cuáles cultivan y son para consumo propio o para venta?
 56. ¿Tienen ingresos de otras fuentes?
 57. De ser así, ¿Cuánto generan mensual o semanalmente?
 58. ¿El café es su principal fuente de ingreso?
 59. ¿Cuántos miembros de la familia dependen de sus ingresos?

ANEXO 6. Retribución social



BUAP



La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

A través del
Instituto de Ciencias
otorga la presente

Constancia

A: **Carol Meritxell Molina Monteleón**

Por haber sido colaboradora en el **“XXXII Coloquio de Investigación del Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales”**, llevado a cabo del 26 al 28 de octubre de 2022.

“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z., a de 23 noviembre de 2022


Dra. Carolina Morán Raya
Directora



“Participación en el XXXII Coloquio de investigación del Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales”



BUAP

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla


a través de la Coordinación General de Atención a los Universitarios y de la
Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A **Carol Meritxell Molina Monteleón**

Por la valiosa retribución social, que de manera entusiasta y comprometida llevó a cabo en las actividades académicas y de divulgación durante el magno evento **“Puertas Abiertas BUAP 2022”**, llevado a cabo el 3 de diciembre de 2022 como parte de las acciones del Plan de Desarrollo Institucional 2021 - 2025.

“Pensar bien para vivir mejor”
H. Puebla de Z., a 3 de diciembre de 2022


Dr. Ygnacio Martínez Laguna
Vicerrector de Investigación y
Estudios de Posgrado

“Participación en el evento “Puertas Abiertas BUAP 2022”

Del campo a la taza: El café, un cultivo estratégico en riesgo

Rosalía Castelán Vega
Centro de Investigación en Ciencias
Agrícolas, rosalia.castelan@correo.buap.mx

José Víctor Tamariz Flores
Centro de Investigación en Ciencias
Agrícolas, jose.tamariz@correo.buap.mx

Marco Antonio Marín Castro
Centro de Investigación en Ciencias
Agrícolas, marco.marin@correo.buap.mx

María Guadalupe Tenorio Arvide
Centro de Investigación en Ciencias
Agrícolas, tenorio.arvide@correo.buap.mx

Miguel Ángel Valera Pérez
Centro de Investigación en Ciencias
Agrícolas, miguel.valera@correo.buap.mx

Carol Molina Monteleón
Posgrado en Ciencias Ambientales, carol.sp@
outlook.es



“Artículo de divulgación “Del campo a la taza: El café, un cultivo estratégico en riesgo”
en la revista SPINOR, año 13, núm. 47, marzo-abril de 2023”

La Universidad Nacional Autónoma de México y diversas
instituciones organizadoras, así como la Sociedad Mexicana
de la Ciencia del Suelo, A.C. otorgan la presente

CONSTANCIA

A

Carol Meritxell Molina, Rosalía del Carmen Castelán,
Amparo Mauricio y José Víctor Tamariz



Por su ponencia “POBLACIONES DE MICROORGANISMOS EN LOS SISTEMAS DE
CULTIVO DE CAFÉ EN CUETZALAN, PUEBLA”

47 CONGRESO MEXICANO DE LA
CIENCIA DEL SUELO


Durante el 47 Congreso Mexicano de las Ciencias del Suelo, del 16 al 20 de octubre del 2023.


Dr. Otilio A. Acevedo Sandoval
Presidente de la Sociedad
Mexicana de la Ciencia del
Suelo A.C.


Dr. Fabián Hernández Luqueño
Vicepresidente de la Sociedad
Mexicana de la Ciencia del
Suelo A.C.


Dra. Ma. Del Coro Arizmendi
Directora de la Facultad de
Estudios Superiores Iztacala
UNAM


Dr. Fernando Ayala Niño
Presidente del Comité de
Organización 47 CMCS


Dra. Blanca Lucía Prado Pano
Coordinadora del PUEIS

“Participación en el 46 Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo en octubre, 2023”



Registro:
DGEC- BUAP - ICIAP- P / Coloq.- 003 / 24
Folio: 7, Foja 519
Del libro de Registros 01/24

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
A través del Instituto de Ciencias (ICUAP)
otorga la presente

CONSTANCIA

A: **Carol Meritxell Molina Montealeón**

Por haber dictado la Ponencia
Análisis de la sustentabilidad de los cafetales de la cooperativa Taposontole, Cuetzalan, Puebla
En el marco del XXXI Coloquio de investigación del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales
Realizado los días 25 y 26 de abril de 2024

"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 28 de junio de 2024


Dr. Carlos Contreras Cruz
Director General de Educación Continua



“Participación en el XXXI Coloquio de investigación del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales”



**La Sede Ciudad Universitaria,
Puebla BUAP**

Otorga el presente reconocimiento a:

Carol Meritxell Molina Montealeón

Por su valiosa participación como: tallerista
En La Noche de las Estrellas 2023



Dr. José Eduardo Espinosa Rosales
Coordinador de Proyectos DGDH BUAP



Dra. Martha Alicia Palomino Ovando
Directora de la facultad de Ciencias Físico Matemáticas



Participación en el evento “Noche de las Estrellas 2023”








**CONGRESO
XXI INTERNACIONAL
XXVII NACIONAL de
CIENCIAS AMBIENTALES
ANCA
VIII IBEROAMERICANO de
FISICA, QUÍMICA AMBIENTAL**
28 - 30 AGOSTO 2024

La Academia Nacional de Ciencias Ambientales ANCA, la Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental y la Universidad Autónoma de Campeche a través del Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Laboratorio de Humedales Costeros, la Dirección General de Estudios de Posgrado e Investigación.

Otorgan la siguiente

CONSTANCIA

a:

Carol Meritzell Molina Monteleón, Rosalía del Carmen Casteján Vega, Amparo Mauricio Gutiérrez, José Víctor Tamariz-Flores
por la presentación de su trabajo titulado:

ESTADO DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELO CON CAFETALES DE MONOCULTIVO BAJO SOL Y BAJO SOMBRA



En el marco del CONGRESO XXI Internacional, XXVII Nacional de Ciencias Ambientales ANCA, VIII Iberoamericano de Física y Química Ambiental San Fco. de Campeche, Campeche, del 28 al 30 de Agosto de 2024.



Dr. Alberto Pereira Corona
Presidente de ANCA



Dr. Homero J. Eudes Campo-Alves
Presidente de SIFyQA



Dr. Domingo Concepción Flores Hernández
Director General de Estudio de Posgrado e Investigación de la UACam



“Participación en el 27 Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, 2024”