



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

## DEPARTAMENTO DE SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE

**SISTEMAS AGROFORESTALES COMO ESTRATEGIA DE MANEJO EN  
SUELOS DEGRADADOS DEL SEMIÁRIDO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE**

PRESENTA:

**FRANCISCO DE JESÚS REYES SÁNCHEZ**

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

**DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ**



1854

COORDINACIÓN GENERAL  
DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**APROBADA**



Chapingo, Estado de México. Mayo, 2025

## **SISTEMAS AGROFORESTALES COMO ESTRATEGIA DE MANEJO EN SUELOS DEGRADADOS DEL SEMIÁRIDO**

Tesis realizada por **FRANCISCO DE JESÚS REYES SÁNCHEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL  
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTORA:

  
DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

ASESORA:

  
DRA. MIRIAM GALÁN RESÉNDIZ

ASESOR:

  
DR. JULIO CESAR BUENDÍA ESPINOZA

## ÍNDICE

|                                                               |      |
|---------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE CUADROS .....                                       | vi   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                        | viii |
| ABREVIATURAS .....                                            | ix   |
| DEDICATORIA .....                                             | x    |
| AGRADECIMIENTOS.....                                          | xi   |
| DATOS BIOGRÁFICOS.....                                        | xiii |
| RESUMEN GENERAL .....                                         | xiv  |
| GENERAL ABSTRACT .....                                        | xv   |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....                                 | 1    |
| 2. OBJETIVOS .....                                            | 4    |
| 2.1 Objetivo general .....                                    | 4    |
| 2.2 Objetivos específicos.....                                | 4    |
| 3. MARCO TEÓRICO .....                                        | 5    |
| 3.1 Caracterización del semiárido .....                       | 5    |
| 3.1.1 El paisaje del semiárido .....                          | 6    |
| 3.1.2 Composición vegetal .....                               | 7    |
| 3.1.3 Uso de suelo .....                                      | 8    |
| 3.2 Degradación de los suelos del semiárido .....             | 9    |
| 3.2.1 Degradación física del suelo .....                      | 9    |
| Compactación .....                                            | 10   |
| 3.2.2 Degradación química del suelo .....                     | 10   |
| Pérdida de nutrientes.....                                    | 11   |
| Salinización y sodificación .....                             | 11   |
| Contaminación.....                                            | 11   |
| 3.3 Sistemas agroforestales del semiárido guanajuatense ..... | 12   |
| 3.4 Literatura citada.....                                    | 14   |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL SEMIÁRIDO GUANAJUATENSE .....                                     | 19 |
| 4.1. Resumen .....                                                                                                    | 19 |
| Abstract .....                                                                                                        | 20 |
| 4.2 Introducción .....                                                                                                | 21 |
| 4.3 Materiales y métodos .....                                                                                        | 22 |
| 4.3.1 Descripción geográfica del área de estudio .....                                                                | 22 |
| 4.3.2 Caracterización de los sistemas agroforestales .....                                                            | 23 |
| 4.3.3 Evaluación de los principales componentes vegetales .....                                                       | 25 |
| 4.3.4 Determinación del índice de agrobiodiversidad.....                                                              | 25 |
| 4.4 Resultados .....                                                                                                  | 28 |
| 4.4.1 Composición vegetal de los sistemas agroforestales.....                                                         | 28 |
| Composición vegetal del sistema agrosilvopastoril.....                                                                | 28 |
| Composición vegetal del sistema silvopastoril.....                                                                    | 31 |
| 4.4.2 índice de agrobiodiversidad de los sistemas agroforestales .....                                                | 33 |
| 4.5 Discusión.....                                                                                                    | 39 |
| 4.6 Conclusiones.....                                                                                                 | 44 |
| 4.7 Literatura citada.....                                                                                            | 45 |
| 5. DEGRADACIÓN DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DEL SEMIÁRIDO: ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS.... | 49 |
| 5.1. Resumen .....                                                                                                    | 49 |
| Abstract .....                                                                                                        | 50 |
| 5.2 Introducción .....                                                                                                | 51 |
| 5.3 Materiales y métodos .....                                                                                        | 52 |
| 5.3.1 Descripción geográfica del área de estudio .....                                                                | 52 |
| 5.3.2 Sistemas evaluados .....                                                                                        | 53 |
| 5.3.3 Determinación de la degradación física del suelo .....                                                          | 56 |
| Muestreo de suelos .....                                                                                              | 56 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Estabilidad estructural.....                                 | 57 |
| Compactación del suelo.....                                  | 58 |
| 5.3.4 Determinación de la degradación química del suelo..... | 59 |
| Materia orgánica .....                                       | 59 |
| Potencial de Hidrogeno del suelo .....                       | 59 |
| Conductividad eléctrica del suelo .....                      | 60 |
| 5.3.5 Análisis estadístico de la degradación del suelo ..... | 60 |
| 5.4 Resultados y discusión.....                              | 61 |
| 5.4.1 Degradación física del suelo .....                     | 61 |
| 5.4.2 Degradación química del suelo .....                    | 66 |
| 5.4.3 Análisis de conglomerados .....                        | 69 |
| 5.5 Conclusiones.....                                        | 71 |
| 5.6 Literatura citada.....                                   | 72 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Categorías de clasificación de la agrobiodiversidad modificadas para sistemas agroforestales del semiárido.....                                | 27 |
| Cuadro 2. Composición vegetal del sistema agrosilvopastoril .....                                                                                        | 29 |
| Cuadro 3. Métricas básicas de los principales componentes frutales del sistema agrosilvopastoril.....                                                    | 30 |
| Cuadro 4. Análisis de varianza de los atributos morfológicos de los árboles....                                                                          | 30 |
| Cuadro 5. Métricas básicas de los agaves y nopales establecidos en del sistema agrosilvopastoril.....                                                    | 31 |
| Cuadro 6. Análisis de varianza de los atributos morfológicos evaluados de las suculentas.....                                                            | 31 |
| Cuadro 7. Clasificación de los elementos vegetales agrupados por familia presentes en el sistema silvopastoril. ....                                     | 32 |
| Cuadro 8. Métricas básicas de los magueyes y mezquites establecidos en el sistema silvopastoril.....                                                     | 33 |
| Cuadro 9. Diversidad de los sistemas agroforestales con respecto al índice individual al que pertenecen conforme la función principal que desempeñan. .  | 33 |
| Cuadro 10. Valor del índice de agrobiodiversidad por sistema y sus subíndices .....                                                                      | 38 |
| Cuadro 11. Potencial de degradación respecto a los valores del índice estructural de Pieri. ....                                                         | 58 |
| Cuadro 12. Clasificación de la degradación del suelo con respecto a la densidad aparente de acuerdo con la clase textural predominante en el suelo. .... | 58 |
| Cuadro 13. Nivel de degradación con respecto al contenido de materia orgánica en el suelo. ....                                                          | 59 |
| Cuadro 14. Clasificación de los valores de pH y elementos químicos potencialmente tóxicos en el suelo. ....                                              | 60 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 15. Interpretación de los valores de la conductividad eléctrica y el nivel de degradación que presentan en el sistema. ....            | 60 |
| Cuadro 16. Comparación múltiple de medias de la degradación física del suelo .....                                                            | 61 |
| Cuadro 17. Índice de estabilidad estructural del suelo mediante la composición granulométrica y contenido de materia orgánica del suelo ..... | 61 |
| Cuadro 18. Nivel de compactación con respecto a la clase textural en función de la densidad aparente del suelo. ....                          | 64 |
| Cuadro 19. Análisis de varianza de la degradación química del suelo .....                                                                     | 66 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Dualidad del semiárido .....                                                                                                | 7  |
| Figura 2. Ubicación del área de estudio.....                                                                                          | 23 |
| Figura 3. Distribución de los sistemas de estudio .....                                                                               | 24 |
| Figura 4. Diagrama radial de los índices individuales de los sistemas evaluados<br>que integran el índice de agrobiodiversidad. ....  | 39 |
| Figura 5. Ubicación del área de estudio.....                                                                                          | 53 |
| Figura 6. Distribución de los sistemas de estudio. ....                                                                               | 54 |
| Figura 7. Relicto de bosque seco del semiárido guanajuatense en época<br>lluviosa.....                                                | 54 |
| Figura 8. Sitio de vegetación alterada del rancho agroecológico.....                                                                  | 55 |
| Figura 9. Sistema silvopastoril establecido en Vía Orgánica. ....                                                                     | 55 |
| Figura 10. Sistema agrosilvopastoril establecido en Vía Orgánica. ....                                                                | 56 |
| Figura 11. Distribución de los puntos de muestreo en el rancho agroecológico                                                          | 57 |
| Figura 12. Índice de estabilidad estructural del suelo de las condiciones de<br>estudio comparado con el límite de estabilidad. ....  | 63 |
| Figura 13. Relación entre el índice de estabilidad estructural y la densidad<br>aparente del suelo de las condiciones de estudio..... | 66 |
| Figura 14. Análisis de conglomerados de las condiciones de estudio de acuerdo<br>con las propiedades del suelo evaluadas. ....        | 71 |

## ABREVIATURAS

| Abreviatura | Significado                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------------------|
| IA          | Índice de aridez                                             |
| pH          | Potencial de Hidrógeno                                       |
| CE          | Conductividad eléctrica                                      |
| spp         | Varias especies                                              |
| sp.         | Especie                                                      |
| et al       | Y otros                                                      |
| A. C.       | Asociación civil                                             |
| SSP         | Silvopastoril                                                |
| ASP         | Agrosilvopastoril                                            |
| RVN         | Relicto de vegetación nativa                                 |
| VNA         | Vegetación natural alterada                                  |
| A.          | Agave                                                        |
| Gto.        | Guanajuato                                                   |
| IEE         | Índice de estabilidad estructural                            |
| IDA         | Índice de agrobiodiversidad                                  |
| GPS         | Sistema de posicionamiento global                            |
| FAO         | Food and Agriculture Organization of the United Nations      |
| CONAFOR     | Comisión Nacional Forestal                                   |
| UACH        | Universidad Autónoma Chapingo                                |
| ITPS        | Intergovernmental Technical Panel on Soils                   |
| IDEAM       | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales |
| INIAP       | Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias          |
| INEGI       | Instituto Nacional de Estadística y Geografía                |

## DEDICATORIA

Pocas cosas en este documento fueron tan difíciles de escribir como esta sección, sabía a quién dedicarla, pero no tenía las palabras correctas para plasmar el sentimiento, y es que fue una persona con la que, en un corto tiempo desarrolle una conexión muy fuerte. Al empezar la maestría y sentirme dudoso e insuficiente, estuvo ella, una persona que, en días anteriores ni sabía de su existencia, pero bastaron unas cuantas semanas para que resultará una amistad muy linda y que con pláticas de aliento, diversión y crítica me motivó a dar lo mejor de mí.

Hoy, mientras escribo esto, con lágrimas en los ojos, le dedico mi trabajo de investigación a la ingeniera **Araceli Montero Nicolas**.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo financiero del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT, hoy Secihti)

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos a través de la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por el espacio para realizar mis estudios de maestría.

A la Dra. Rosa María por la supervisión en la toma de datos en campo y por su excelente dirección durante el trabajo de investigación.

A la Dra. Miriam Galán por el apoyo y supervisión durante el trabajo realizado en campo y por sus múltiples aportaciones de gran valía en la realización de este documento.

Al Dr. Julio Cesar por su apoyo en el análisis estadístico de los datos de campo de la vegetación.

Al rancho agroecológico Vía Orgánica por abrir sus instalaciones y permitir la realización de mi investigación, así como por las atenciones brindadas durante mi estancia.

A las ingenieras Azucena Cabrera y Mayra Martínez, colaboradoras del rancho agroecológico, por el apoyo brindando durante el establecimiento de la fase de campo y el apoyo brindando cada que era requerido.

A las compañeras Belem Rosales, Karen Hernández, Lisset Reyes y Nandy Espino por su apoyo en la caracterización de los sistemas agroforestales.

A las compañeras y compañeros Guadalupe Pantaleón, Carmen García, Indira Osorio, Gael Molina, Daniel Matehuala, Alan Salto, Axel Vizuet, Héctor Barrón, Israel García y Ricardo Magadan por su apoyo en el muestreo, preparación y análisis de las muestras de suelo para llevar a cabo este proyecto.

Al Dr. Martin Galicia por su contribución en el análisis estadístico de los datos de campo del suelo.

Al ingeniero Ranulfo Cruz por el apoyo en los momentos de incertidumbre y por estar presente en los días de agotamiento, especialmente en las últimas etapas de redacción de este documento.

A mis amistades Nadia Quiroz, Belem Rosales y Guadalupe Pantaleón, por mantenerme al tanto de sus vidas lo que permitió que la realización de este trabajo fuese más grata.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **Datos personales**

Nombre: Francisco de Jesús Reyes Sánchez

Fecha de nacimiento: diciembre 21, 1999

Lugar de nacimiento: Atzitzintla, Puebla, México.

CURP: RESF991221HPLYNR08

Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos

Cédula profesional: 13648346



### **Desarrollo académico**

Preparatoria. Preparatoria Agrícola Chapingo

Licenciatura. Ingeniería Agronómica con especialidad en el suelo. Universidad Autónoma Chapingo.

Maestría. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.

## RESUMEN GENERAL

### Sistemas agroforestales como estrategia de manejo en suelos degradados del semiárido<sup>1</sup>

Las zonas semiáridas enfrentan serios desafíos debido a la degradación de los recursos naturales provocada por prácticas agrícolas insostenibles. En este contexto, se evaluó el impacto de los sistemas agroforestales en un área degradada del semiárido guanajuatense. El estudio incluyó cuatro condiciones diferentes: un relicto de vegetación nativa, un sitio de vegetación natural alterada, y dos sistemas agroforestales (agrosilvopastoril y silvopastoril). La caracterización se realizó mediante recorridos en los sistemas agroforestales donde se evaluaron atributos morfológicos de árboles y suculentas; del mismo modo, se identificaron las especies y su importancia para determinar el índice de agrobiodiversidad. Para identificar el estado del suelo, se muestreo de manera sistemática a 20 cm de profundidad y se analizaron diversas propiedades (estabilidad estructural, compactación, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica) de acuerdo a las normativas oficiales además del análisis de varianza ( $\alpha = 0.05$ ) para el suelo y los atributos morfológicos. Los resultados mostraron que en el agrosilvopastoril; la mora (*Morus alba*), presentó una mayor cobertura con diferencias estadísticamente significativas con respecto a los otros frutales mientras que las suculentas presentaron datos similares; así como el mayor índice de agrobiodiversidad (0.71), indicando que las especies presentes son importantes para los usuarios. En el silvopastoril únicamente se presentan mezquites (*Neltuma* sp.) y el índice (0.64) fue ligeramente por debajo del límite de estabilidad (0.66). En cuanto al suelo, no se detectó degradación química, las propiedades evaluadas se encontraron dentro de los rangos óptimos, sin embargo, si se observó degradación física a nivel de compactación en ambos sistemas agroforestales, con densidades que superan los  $1.60 \text{ g cm}^{-3}$  en suelos arcillosos. Estadísticamente se presentaron diferencias significativas entre la condición natural y las intervenidas. Los sistemas agroforestales son una alternativa para contrarrestar la degradación ya que permiten regenerar paisajes degradados, mejorar la productividad y apoyar la sostenibilidad local.

**Palabras clave:** Agroforestería, Sostenibilidad, Conservación, Resiliencia

---

<sup>1</sup>Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Francisco de Jesús Reyes Sánchez

Supervisora de tesis: Rosa María García Núñez

## GENERAL ABSTRACT

### Agroforestry systems as a management strategy for degraded soils in semi-arid regions<sup>2</sup>

Semi-arid areas face significant challenges due to the degradation on natural resources, caused by unsustainable agricultural practices. In this context, the impact of agroforestry systems was evaluated in a degraded area of the semi-arid region of Guanajuato. The study included four different conditions: a relic of native vegetation, a site of altered natural vegetation, and two agroforestry systems (agrosilvopastoral and silvopastoral). Characterization was conducted through field surveys of the agroforestry systems, where morphological attributes of trees and succulents were assessed. Similarly, species were identified, and their importance was determined to calculate the agro-biodiversity index. To identify the soil condition, systematic sampling was performed at a depth of 20 cm, and various properties (structural stability, compaction, organic matter, pH, and electrical conductivity) were analyzed according to official standards, in addition to variance analysis ( $\alpha = 0.05$ ) for both soil and morphological attributes. The results showed that in the agrosilvopastoral system, mulberry (*Morus alba*) had a greater coverage with statistically significant differences compared to the other fruit trees, while succulents showed similar data, as well as the highest agro-biodiversity index (0.71), indicating that the species present are important to the users. In the silvopastoral system, only mesquites (*Neltuma* sp.) were present, and the index (0.64) was slightly below the stability threshold (0.65). Regarding the soil, no chemical degradation was detected, the evaluated properties were within optimal ranges; however physical degradation due to compaction was observed in both agroforestry systems, with densities exceeding  $1.60 \text{ g cm}^{-3}$  in clayey soils. Statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ ) were found between the natural and intervened conditions. Agroforestry systems are an alternative to counteracting degradation as they regenerate degraded landscapes, improve productivity, and support local sustainability.

**Keywords:** Agroforestry, Sustainability, Conservation, Resilience

---

<sup>2</sup> Thesis. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.  
Author: Francisco de Jesús Reyes Sánchez  
Advisor: Rosa María García Núñez

## **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

En Latinoamérica, más del 50 % de las tierras cultivables son afectadas por algún proceso degradativo ocasionado por los cambios de uso del suelo, sobreexplotación de los recursos, cambio climático e inequidad social (Gardi, et al., 2014). Las tierras bajo condiciones áridas y semiáridas sufren una mayor presión sobre los recursos naturales que ellas sustentan, estos se ven afectados por los asentamientos humanos, que practican actividades de recolección y agricultura de subsistencia (Burneo, 2013) con actividades agrícolas no sustentables que propician el deterioro del entorno, lo que afecta directamente los recursos naturales bióticos y abióticos (Bareiro, 2017).

La vegetación y el suelo en los ecosistemas naturales sufren los mayores impactos de las comunidades rurales locales. La vegetación es afectada en su estructura y composición por la transformación del paisaje (Duan, et al., 2019), lo que reduce su capacidad para mitigar el impacto de los fenómenos naturales y prevenir el riesgo de que estos se conviertan en desastres. Por otro lado, el suelo presenta alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas que dan paso a procesos erosivos más intensos que dejan graves afectaciones al sistema, y con ello, la pérdida de la estabilidad. (López, Reynoso, López-Martínez, Camas y Tasistro, 2018).

La degradación física se produce como consecuencia de la convergencia de diferentes fenómenos naturales y antrópicos, uno de los fenómenos más desgastantes es la compactación, este proceso está relacionado con la reducción de la porosidad (Lahuatte y Recalde, 2015) que lleva al aumento de la densidad aparente, como resultado, se expresa mayor estrés hídrico, menor desarrollo radicular y, por ende, una menor producción de biomasa (Barzegar, Yousefi y Zargoosh, 2016).

La degradación química también resulta de los fenómenos degradativos que suceden en la superficie y el perfil del suelo, este tipo de degradación está relacionada con la transformación de los residuos orgánicos que involucra procesos específicos como el reciclaje de nutrientes y la tasa de mineralización, realizados por los microorganismos del suelo, así como la contaminación, salinización, acidificación y pérdida o distribución irregular de los nutrientes del suelo (Muñoz, Ferreira, Escalante y López, 2013).

Los sistemas productivos en las zonas secas caracterizados por suelos degradados que tienden a la desertificación a causa de las condiciones climáticas actuales y la disminución o pérdida de especies vegetales, con manejo inadecuado presentan producciones deficientes que no alcanzan a cubrir las necesidades básicas de las comunidades rurales; de igual forma se disminuyen los servicios ecosistémicos, el control de la erosión, los refugios de la fauna silvestre, entre otros (Afzali, Khanamani, Maskooni y Berndtsson, 2021). Ante esto, es necesario llevar a cabo un manejo integrado del suelo, dando la oportunidad a los recursos naturales y a la sociedad de prevalecer en el mismo entorno (Restovich, Andriulo y Portela, 2018).

Ante esta problemática, los sistemas agroforestales son establecidos como una estrategia eficiente para el mejoramiento de los sistemas productivos en estas zonas (Mazo, Eliecer y Castro, 2016). Estos sistemas constituyen un modelo de gestión de la diversidad biológica que enriquece las características y atributos del agroecosistema lo que preserva su multifuncionalidad, al mismo tiempo genera beneficios socioambientales que favorecen el desarrollo rural, especialmente en zonas semiáridas (Lucio, 2021).

En los sistemas agroforestales se establecen componentes, principalmente nativos de uso múltiple como árboles, arbustos y herbáceas con cultivos agrícolas y animales que interactúan en la misma superficie bajo diferentes esquemas de plantación (Peri, Chará, Viñoles, Bussoní y Cubbage, 2024).

Los sistemas agroforestales desarrollan un papel significativo dentro de la conservación de la diversidad biológica, además, desempeñan un papel crucial en la captura de carbono y como estrategias de adaptación al cambio climático (Lucio, 2021). Estos agroecosistemas ofrecen una alternativa viable de producción y conservación lo que ofrece múltiples beneficios a los habitantes de estas regiones para subsistir (Tamayo y Alegre, 2022).

Por lo tanto, el propósito de esta investigación fue evaluar el impacto de los sistemas agroforestales en un área alterada del semiárido guanajuatense mediante la caracterización del paisaje y la determinación de algunas propiedades físicas y químicas usadas para identificar el estado del suelo bajo diferentes usos.

El presente documento consta de 4 capítulos; el primero fue destinado a la introducción general donde se presentan antecedentes, justificación y objetivos para la realización de esta investigación; el segundo, la revisión de literatura donde se plasmó el panorama por el que atraviesan las zonas semiáridas, la vulnerabilidad de sus recursos y las consecuencias que ocurren cuando se hace uso irracional de estos recursos; el tercer capítulo es un artículo sobre la caracterización vegetal de los sistemas agroforestales de las zonas semiáridas que demuestra al sistema agroforestal establecido con plantas nativas de uso múltiple como una opción viable para la sostenibilidad local; finalmente, el cuarto capítulo fue destinado al artículo sobre la degradación física y química del suelo en condiciones semiáridas, este demuestra que las intervenciones sociales sobre los ecosistemas generan alteración y desgaste en el sitio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el impacto de los sistemas agroforestales en un área degradada del semiárido mediante la caracterización, determinación de la compactación, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica para identificar el estado actual y proponer alternativas de manejo y conservación.

### **2.2 Objetivos específicos**

Caracterizar los sistemas agroforestales de acuerdo con el índice de agrobiodiversidad para explicar la composición y el funcionamiento de los componentes en los sistemas.

Determinar la estabilidad estructural y compactación para medir el grado de degradación física en las diferentes condiciones de estudio.

Determinar el contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica para medir el grado de degradación química en las diferentes condiciones de estudio.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Caracterización del semiárido**

La superficie terrestre enfrenta importantes desafíos, las zonas áridas y semiáridas presentan una problemática común: la fragilidad y vulnerabilidad de sus ecosistemas ante las intervenciones del hombre (Gardi, et al., 2014). Esta tendencia a la desertificación de la tierra y degradación de los suelos se debe principalmente a las prácticas agrícolas inadecuadas y al aumento de la población (Mazuela, 2013).

En México, las zonas áridas y semiáridas abarcan el 54 % de la superficie y son hogar de más del 40 % de la población nacional (Briones, Búrquez, Martínez-Yrizar, Pavón y Perroni 2018). Para el estado de Guanajuato cerca de la mitad de su territorio presenta condiciones climáticas semiáridas (Rodríguez, et al., 2014).

Una de las características de las áreas de clima árido y semiárido es la baja disponibilidad de agua (Mazuela, 2013) demostrada por un alto índice de aridez, el cual indica si la cantidad de precipitación en una región es suficiente o no para mantener sus ecosistemas, para las regiones semiáridas varía entre 0.20 y 0.50 (CONAFOR-UACH, 2013). Por estas condiciones, los sistemas presentes en estos sitios se encuentran entre los espacios más expuestos a la degradación del suelo.

En estas áreas es común que se presenten vientos fuertes que propicien la erosión eólica y junto con las malas prácticas agrícolas, se intensifican los procesos erosivos y la pérdida de los recursos se vuelve mayor (Robles, Bugueño, Pefaur, Pizarro y Álvarez, 2020). Otro de los factores que impulsan la degradación del suelo es la falta de cobertura vegetal al final de la estación seca, lo cual es una característica distintiva de estos espacios, junto con las sequías prolongadas (Klich, 2017).

A pesar de las condiciones climáticas intensas que generan un aspecto desolado y aparentemente poco productivo, estos ecosistemas exhiben una gran diversidad biológica, con una riqueza florística estimada en alrededor de 6,000 especies, lo que representa aproximadamente 27 % de la flora en el país (Gelviz-Gelvez y Pavón, 2013), esta diversidad está interconectada mediante una red de interacciones biológicas y de flujo de materia y energía entre las especies y el medio abiótico para proporcionar múltiples recursos y servicios ambientales (Montaño, et al., 2016).

### **3.1.1 El paisaje del semiárido**

El paisaje semiárido es el resultado de la combinación de diversos factores, siendo el clima y el régimen hídrico, los más influyentes de todos (Medina, 2017). Esto ha determinado la existencia de ecosistemas y agroecosistemas específicos que forman áreas naturales cuyo valor, diversidad y calidad ecológica son innegables.

Las tierras áridas sustentan una vegetación diversa compuesta por plantas leñosas de porte bajo, así como plantas suculentas y gramíneas que forman matorrales xerófilos y pastizales (Rzedowski, 2006). El clima se clasifica dentro de los secos (B) con temperaturas promedio de 18 °C y precipitaciones menores a los 650 mm anuales (García, 2004), con dos estaciones bien definidas, un periodo seco que puede abarcar hasta 9 meses donde lo único que sobrevive son las plantas con adaptaciones morfológicas; el resto del año corresponde a un periodo húmedo, donde la presencia de lluvias, aunque esporádicas, estimulan la germinación y reproducción de herbáceas para la preservación de las especies (Cetzal-Ix, 2018).

El régimen hídrico y las temperaturas de estos espacios influyen en la calidad de las herbáceas, generalmente se presentan plantas de porte bajo y con un alto valor nutritivo posicionándose como una buena fuente de alimento para el ganado (Boza, Robles y González, 2014). Con las especies forestales ocurre algo similar, además de un lento desarrollo, presentan un crecimiento secundario deficiente.

Dentro de las plantas que habitan en estos espacios, las leguminosas han prevalecido en estas condiciones debido al sistema radicular que presentan y las asociaciones que forman con microorganismos fijadores de nitrógeno. Las leguminosas del género *Prosopis* (Recientemente actualizado a *Neltuma*) se han destacado por su utilidad en el desarrollo de estas zonas (Zamora-Zamora, Bello-Alarcón y Villavicencio-Velásquez, 2019). Los procesos de formación del suelo, también son influenciados por las condiciones climáticas, en estas zonas se presentan suelos con un perfil poco desarrollado con textura, pH y fertilidad variables (Mazuela, 2013).



Figura 1. Dualidad del semiárido

### 3.1.2 Composición vegetal

En los ecosistemas semiáridos, las plantas soportan condiciones climáticas y ambientales muy estresantes, así como suelos de fertilidad variable (Quiñónez, et al., 2018), estas zonas son caracterizadas temperaturas extremas, largos periodos de sequía y una escasa o casi nula cobertura vegetal. Dichos elementos repercuten en el comportamiento de las diversas especies que se han adaptado a vivir en estas condiciones (CONAFOR, 2021).

La vegetación de zonas áridas presenta grandes variaciones. Predominan las formas de vida arbustiva, con plantas bajas, leñosas y muy ramificadas desde la base (Arriola-Padilla, et al., 2015). Las tres familias más ricas en flora del semiárido representan aproximadamente el 32 % de todos los géneros y cerca

del 34 % de todas las especies. La familia de las compuestas tiene un dominio predominante en este rubro, seguida por las gramíneas y las leguminosas (Ramírez-Bravo y Hernández-Santino, 2016). La mayor parte de la flora es anual, lo cual ofrece un contraste entre la temporada seca y la lluviosa, cuando se cubre de follaje y floraciones multicolores.

El estrato arbustivo y algunas zonas de pastizal, incluyen mezquites y huizaches, junto con algunas cactáceas como los nopales y los garambullos, así también se pueden apreciar múltiples variedades de agaves (Blanco, Vázquez, Reyes y Guzmán, 2015). Los sistemas de las zonas semiáridas pueden constituir un agroecosistema dinámico y estable, siempre y cuando el número de personas y animales que utilizan sus recursos se adecue a las capacidades de explotación del entorno (Chávez-Espinoza, Cantú-Silva, González-Rodríguez y Montañez-Valdez, 2022).

### **3.1.3 Uso de suelo**

Algo que comparten más de la mitad de las áreas degradadas es la forma en que se utiliza y ocupa el suelo. El uso sin una planificación y gestión adecuada de las tierras agrícolas y bosques secos favorece la degradación del suelo y la disminución de la biodiversidad en estos entornos (Coelho y Marcos, 2020). Cualquiera que sea la forma en que se aproveche el suelo, es importante asegurar la conservación de los recursos, esto implica que debe ser capaz de generar múltiples beneficios ecológicos, sociales y económicos en comparación con otras actividades (Haro-Martínez y Taddei-Bringas, 2014). En áreas semiáridas se lleva a cabo el uso múltiple de los terrenos, lo que implica que el manejo este enfocado bajo diversos propósitos como la ganadería, agricultura, silvicultura, vida silvestre o para actividades recreativas (Blanco, et al., 2015). Este enfoque se da debido a la escasez y las necesidades de una población que depende de estos entornos, con la integración de la ganadería a estos agroecosistemas además de diversificar los productos obtenidos, presenta beneficios ambientales, ya que aumentan la fertilidad de los suelos (Boza, et al., 2014).

### **3.2 Degradación de los suelos del semiárido**

La degradación del suelo es el proceso que reduce la capacidad del suelo para cumplir con las funciones, ya sea por causas naturales o por acciones humanas (FAO, 2016). En las regiones áridas o semiáridas, la degradación es el resultado del cambio de uso de suelo por las actividades humanas, junto con las altas temperaturas y escasas lluvias intensifican este proceso y contribuyen a la fragmentación de los ecosistemas (Bhattacharyya, et al., 2015; Karlen y Rice, 2015) y agroecosistemas.

La degradación del suelo se agrava por la escasez de agua en estos entornos, lo que lleva a la biota a enfrentarse a condiciones de supervivencia extremas (Günel, Korucu, Birkas, Özgöz y Halbac-Cotoara-Zamfir, 2015). Los suelos degradados poseen una baja calidad, lo que restringe la capacidad de los ecosistemas para ofrecer servicios tanto ambientales como productivos. La degradación puede manifestarse en formas físicas, químicas, biológicas o ecológicas (Lal, 2015).

#### **3.2.1 Degradación física del suelo**

La degradación física es un proceso que se caracteriza por la reducción de la capacidad y el potencial del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos, sus características físicas se ven alteradas, como resultado de actividades humanas relacionadas principalmente con la agricultura o por causas naturales (Wang, et al., 2023). La degradación física genera cambios desfavorables al impactar la capacidad para transmitir fluidos, así como en el volumen de almacenamiento relacionado con el equilibrio de gases y agua necesario para la disolución de nutrientes para las plantas y microorganismos (López, et al., 2018). Estos procesos pueden tener lugar en la superficie del suelo o en capas subsuperficiales, los efectos más comunes incluyen, la compactación y la formación de costras del suelo (Piscitelli, 2015).

Lamentablemente, muchas veces se perciben como procesos naturales que ocurren en el suelo, en lugar de reconocerlos como resultado del uso y manejo inadecuado de este recurso (Reyes, 2014).

### **Compactación**

La compactación es un proceso de deterioro de los suelos en el cual se comprime la masa de suelo debido a la aplicación de cargas o presiones causadas por eventos naturales o provocadas por la actividad humana (FAO, 2016), lo que provoca la disminución del volumen de poros aumentando la densidad aparente del suelo (Bustamante, Chabla-Carrillo y Barrezueta-Unda, 2018).

La disminución de la macroporosidad afecta la capacidad de aireación y oxigenación del suelo, lo que provoca que la exploración de las raíces disminuya y con ello la absorción de agua y nutrientes, alterando el crecimiento y desarrollo de las plantas (Quintero, Chaparro, Bernal y Baquero, 2016; Fernández, et al., 2020). Además, la pérdida de la porosidad aumenta las probabilidades de que se presenten problemas de drenaje; disminuye la conductividad hidráulica y la capacidad de retención del agua (Romero, Silva y Seguel, 2016; Torres, Gutiérrez y Beltrán, 2020). Otro de los efectos de la compactación se basa en la tasa de drenaje, al ser disminuida, pueden aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero por parte del suelo, por ejemplo, los liberados en la desnitrificación, (Flores-López, González-Acuña, De La Mora-Orozco, Vidrio-Llamas y Ramírez-Vega, 2023).

#### **3.2.2 Degradación química del suelo**

La presencia de compuestos no deseados en el suelo conduce a procesos que alteran tanto la composición como las funciones del mismo, lo cual puede ser resultado de fenómenos naturales o actividades humanas, como las aplicaciones constantes de agroquímicos o el derrame de sustancias peligrosas en el suelo.

Estos eventos pueden provocar la pérdida de nutrientes, salinización y la contaminación química del suelo (Castro-Carreño, Delgado-Londoño y Gonzales-Forero, 2022).

### **Pérdida de nutrientes**

La disminución de nutrientes implica un desequilibrio en las sustancias químicas presentes en el suelo, lo que afecta las interacciones entre sus componentes. Por ejemplo, puede manifestarse en cambios no deseados en el pH, erosión y pérdida de sedimentos. La cantidad de nutrientes perdidos varía según la naturaleza de la sustancia considerada como nutriente y su interacción en el suelo (Luria, 2019).

### **Salinización y sodificación**

La salinización es un proceso en el que aumenta la concentración de sales en el suelo y puede surgir tanto de forma natural, debido a características geológicas o por actividades humanas (IDEAM, 2017). La sodificación implica el incremento de sales monovalentes, especialmente aquellas que contienen sodio. Este problema no solo afecta a las zonas de riego, sino que también es común en áreas con drenaje natural limitado y un nivel freático próximo a la superficie, donde se realiza un manejo del suelo inadecuado (Piscitelli, 2015).

### **Contaminación**

La contaminación del suelo se lleva a cabo cuando están presentes sustancias químicas en concentraciones elevadas que no son naturales del entorno y que causan efectos no deseados en los organismos del sitio. Está vinculado al sector productivo, siendo la agricultura y las actividades ganaderas algunas de las principales fuentes generadoras de dichas sustancias. Entre los contaminantes más comunes se encuentran los compuestos nitrogenados y fosforados, pesticidas, elementos traza, entre otros (FAO e ITPS, 2015).

### **3.3 Sistemas agroforestales del semiárido guanajuatense**

En las zonas áridas y semiáridas se emplean diferentes especies de plantas, tanto leguminosas como no leguminosas, que dependiendo de la temporada y la disponibilidad son consumidas por el ganado a través del pastoreo (Foroughbakhch, Hernandez-Piñero y Carrillo-Parra, 2013). Estas plantas presentan un alto contenido de nutrientes las cuales permiten a los animales que las consumen cubrir sus requerimientos nutricionales. Además, son establecidas bajo un esquema especializado que controla la erosión, lo que da mayor estabilidad al suelo (Espinoza, et al., 2020). El uso e implementación de estas especies en sitios de explotación agrícola y pecuaria, permite mejorar la productividad y ampliar la sostenibilidad de los agroecosistemas de producción convencionales transformándose a modelos agroforestales (Chávez-Espinoza, et al., 2022).

El establecimiento del sistema agroforestal con especies leñosas palatables al ganado, especialmente para pequeños rumiantes, permite una explotación integral del entorno (Holanda, Pereira y Ferelli, 2017) ya que requiere de menor inversión en el mantenimiento y proporciona una ocupación estable durante todo el año. Todo esto se integra de manera efectiva en los modelos de aprovechamiento sostenible (Álvarez-Icaza, 2014). En la medida en que se utilicen leguminosas arbóreas y herbáceas en mayor densidad como fuente de alimento para el ganado, se promueve el almacenamiento de carbono y la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico, lo que contribuye al bienestar social y la producción animal (Leahy, Kearney, Reisinger y Clark, 2019). Sin embargo, no solo la crianza de animales es la opción para estos sitios, la producción de cultivos intercalados con árboles de uso múltiple presenta también grandes beneficios a los habitantes de dichas regiones (Tamayo y Alegre, 2022).

Las experiencias con sistemas agroforestales en zonas tropicales sugieren que pueden ser una alternativa válida para los sistemas de subsistencia en las zonas secas caracterizados por su baja producción a causa de la degradación del suelo, desertificación y otros factores socioambientales (Mazo et al., 2016).

Un estudio de caso, al sur del semiárido guanajuatense se llevó a cabo el establecimiento del proyecto “Un billón de agaves” por parte de la asociación Vía Regenerativa y Orgánica de México, A. C. (Vía Orgánica) con el objetivo de establecer un billón de agaves, estos se establecieron en combinaciones con plantas de mezquite, por su utilidad en la región como fuente de leña y forraje para el ganado.

El diseño seleccionado fue el de cultivos en callejones, donde se combinan hileras de agaves y de mezquites en franjas intercaladas con cultivos anuales o pastos perennes. De este sistema se aprovechan las vainas y ramas tiernas del mezquite, así como las pencas de maguey como forraje de alta calidad para el ganado ovino, caprino, algunos cerdos y gallinas (Vía Orgánica, 2020).

### 3.4 Literatura citada

- Afzali, S. F., Khanamani, A., Maskooni, E. K. & Berndtsson, R. (2021). Quantitative assessment of environmental sensitivity to desertification using the modified MEDALUS model in a semiarid area. *Sustainability*. 13, 7817. <https://doi.org/10.3390/su13147817>
- Álvarez-Icaza, L. P. (2014). El uso y la conservación de la biodiversidad en propiedades colectivas: Una propuesta de tipología sobre los niveles de gobernanza. *Revista mexicana de sociología*, 76(spe), 199-226. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-25032014000600008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-25032014000600008&lng=es&tlng=es)
- Arriola-Padilla, V. J., Estrada-Martínez, E., Medellín-Jiménez, R., Gijón H., A. R., Pichardo-Segura, L. A., Pérez-Miranda R. y Ortega-Rubio, A. (2015). Áreas Naturales Protegidas del Centro de México: degradación y recomendaciones. En: Ortega-Rubio, A., Pinkus-Rendón, A. M. y Espitia-Moreno, I. C. (Eds). *Las Áreas Naturales Protegidas y la Investigación Científica en México*. 337-374.
- Bareiro, L. R. (2017). Desarrollo rural en tierras secas. FEDIAP; Educación y Desarrollo, para el Medio Rural y su Gente. URL: <http://fediap.com.ar/administracion/pdfs/Desarrollo%20Rural%20en%20Tierras%20Secas.pdf>
- Barzegar, A., Yousefi, A. & Zargoosh, N. (2016). Water stress and soil compaction impacts on clover growth and nutrient concentration. *Eurarian journal of soil science (EJSS)* 5(139) 139-145.
- Bhattacharyya, R., Ghosh, B. N., Mishra, P. K., Mandal, B., Rao, C.S., Sarkar, D. & Hati, K. M. (2015). Soil Degradation in India: Challenges and Potential Solutions. *Sustainability* 7(4) 528-3570. <https://doi.org/10.3390/su7043528>
- Blanco L., P., Vázquez S., V., Reyes A., J. A., y Guzmán C., M. G. (2015). Inventario de recursos turísticos como base para la planificación territorial en la zona Altiplano de San Luis Potosí, México. *Cuadernos de Turismo*, (35) 17–42. <https://doi.org/10.6018/turismo.35.221491>
- Boza L., J., Robles A., B. y González R., J. L. (2014). El papel de la ganadería en las zonas áridas de Andalucía. En Junta de Andalucía y Consejería de agricultura y pesca. (Eds), *La ganadería Andaluza en el siglo XXI.1*. 241-266. [https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio\\_Ganadero\\_Tomo\\_I.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio_Ganadero_Tomo_I.pdf)
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., y Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24(Núm. esp.), <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Burneo, M. (2013). Elementos para volver a pensar lo comunal: nuevas formas de acceso a la tierra y presión sobre el recurso en las comunidades campesinas de Colán y Catacaos. *Antropológica del Departamento de Ciencias Sociales*, 31 (31), 15-41.
- Bustamante L., M., Chabla-Carrillo, J. y Barrezueta-Unda, S. (2018). La densidad y humedad crítica como indicadores de la compactación de suelos

- cultivados con banano. *Agroecosistemas*, 6(1), 169-174.  
<https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>
- Castro-Carreño, A., Delgado-Londoño, D. M. y Gonzales-Forero, R. (2022). La degradación del suelo, impactos y contexto normativo. En Castro-Carreño, A., Leguizamón-Zárate, C. A. y Fonseca-Ortiz, T. L. (Eds.). Gestión sostenible del recurso suelo, desde los modelos de seguimiento y recuperación en las Fuerzas Militares. *Sello Editorial Esmic*. 11-23. DOI: <https://doi.org/10.21830/9786289544626.01>
- Cetzal-Ix, W. (2018). Sistemas agroforestales y biodiversidad. *Agro Productividad*, 9(9). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/818>
- Chávez-Espinoza, M., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H. y Montañez-Valdez, O. D. (2022). Sistemas de producción de pequeños rumiantes en México y su efecto en la sostenibilidad productiva. *MVZ Córdoba*, 27(1), <https://doi.org/10.21897/rmvz.2246>
- Coelho C., F. & Marcos S., A. (2020). Salinity of the soil and the risk of desertification the semiarid region. *Mercator*, 19(1), 19002. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>
- Comisión Nacional Forestal - Universidad Autónoma Chapingo. (2013). Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma de Chapingo. Zapopan, Jalisco. *Comisión Nacional Forestal*
- Comisión Nacional Forestal. (2021). Las zonas áridas son más que un desierto. <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/las-zonas-aridas-son-mas-que-desierto?idiom=es>
- Espinoza C., M., Rodríguez G., H., Silva C., I., Correa C., M., Castellón E., A. E., Barragán B., H. & Meza G., M. V. (2020). Foliar mineral content of five shrub species with nutritional potential for small ruminants in semiarid regions in northeastern Mexico. *Ciência Rural*, 50(10). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200202>
- Duan, C., Shi, P., Song, M., Zhang, X., Zong, N. & Zhou, C. (2019). Land use and land cover change in the kailash sacred landscape of China. *Sustainability*. 11(6), 1788. <https://doi.org/10.3390/su11061788>
- Fernández, R., Furch N., E., Bissolino, M., Frasier, I., Scherger, E. D. y Quiroga, A. R. (2020). Efecto de las pasturas perennes en la fertilidad física y biológica en molisoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia del suelo*, 38(1), 133-148. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672020000100012&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000100012&lng=es&tlng=es)
- Flores-López, H. E., González-Acuña, I. J., De La Mora-Orozco, C., Vidrio-Llamas, G. y Ramírez-Vega, H. (2023). Costo de CO<sub>2</sub> en la fertilización nitrogenada para captura de carbono orgánico en suelo en maíz forrajero de temporal. En Bautista, F. y Ayala, F. (Eds.). Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo (Vol. 2). Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. Texcoco, Estado de México. 38-43.
- Foroughbakhch, R., Hernandez-Piñero, J. & Carrillo-Parra, A. (2013). Composition and animal preference for plants used for goat feeding in

- semiarid Northeastern Mexico. *Journal of Animal and Plant Sciences*. 23. 1034-1040.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Olmedo, G., Comerma, J., Cruz-Gaistardo, C. y Rodríguez, D. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Luxemburgo, *Comisión Europea* - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 176. DOI: 10.2788/37334
- Gelviz-Gelvez, S. M. y Pavón H., N. P. (2013). Diversidad de especies arbustivas en una zona semiárida del centro de México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 323-335. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.049>
- Günel, H., Korucu, T., Birkas, M., Özgöz, E. & Halbac-Cotoara-Zamfir, R. (2015). Threats to Sustainability of Soil Functions in Central and Southeast Europe. *Sustainability*, 7 (2), 2161-2188. <https://doi.org/10.3390/su7022161>
- Haro-Martínez, A. A. y Taddei-Bringas, I. C. (2014). Sustentabilidad y economía: la controversia de la valoración ambiental. *Economía, sociedad y territorio*, 14(46), 743-767. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-84212014000300007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212014000300007&lng=es&tlng=es)
- Holanda J., E. V., Pereira G., V. y Ferelli S., J. D. (2017). Los sistemas de producción de rumiantes menores en el semiárido brasileño y sus limitantes productivas. En Iñiguez R., L. (ed). La producción de rumiantes menores en las zonas áridas de Latinoamérica. *Embrapa*. 71-94
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización.
- Karlen, D. L. & Rice, C. W. (2015). Soil Degradation: ¿Will Humankind Ever Learn? *Sustainability* 7(9). 12490-12501. <https://doi.org/10.3390/su70912490>
- Klich, M. G. (2017). Bases agropecuarias. Viedma: *Editorial UNRN*.
- Lahuate I., B. C., y Recalde V., M. A. (2015). Propiedades físico-químicas del suelo como instrumentos de evaluación a las estrategias de restauración implementadas en áreas degradadas de páramo, caso de estudio: microcuencas Antisana y Pita. 262. *Quito*
- Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7(5). 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Leahy, S. C., Kearney, L., Reisinger, A. & Clark, H. (2019). Mitigating greenhouse gas emissions from New Zealand pasture-based livestock farm systems. *Journal of New Zealand Grasslands*, 81, 101–110. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2019.81.417>
- López B., W., Reynoso S., R., López-Martínez, J., Camas G., R. y Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 65-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>

- Lucio, C. (2021). Los sistemas agroforestales de los alrededores del Nevado de Colima. La importancia biocultural de un patrimonio amenazado. *Revista Paginas*, 14(34). <https://doi.org/10.35305/rp.v14i34.584>
- Luria, S. (2019). Nutrientes del suelo: ¿que son?, importancia, su pérdida y más. <https://magicanaturaleza.com/c-suelos/nutrientes-del-suelo/>
- Mazo, N. D., Eliecer R., J. y Castro, A. (2016). Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los sig. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 25 (1), 65-77.
- Mazuela A., P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia* (Arica), 31(2), 3-4. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Medina V., M. D. (2017). Análisis multiescalar del paisaje semiárido de la región de Murcia y propuesta de gestión. *Papeles de Geografía*, (63).
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García O., F., García S., R. y Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34 (1), 39-59.
- Muñoz I., D. J., Ferreira R., M., Escalante A., I. B., y López G., J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 201-210. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792013000400201&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000400201&lng=es&tlng=es).
- Organización de Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). Compactación del suelo. <https://www.fao.org/3/a-i6473s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR)-Main Report. <http://www.fao.org/3/%0Aa-i5199e.pdf%0A>
- Peri, P. L., Chará, J., Viñoles, C., Bussoní, A. & Cubbage, F. (2024). Current trends in silvopastoral systems. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01093-5>
- Piscitelli, M. (2015). Degradacion de suelos. *UNICEN*; Universidad nacional del centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>
- Quintero, J., Chaparro, O., Bernal, J. y Baquero, J. (2016). Evaluación de la estabilidad estructural y espacio poroso en un Oxisol de sabana de los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 7(10) .22490/21456453.1613.
- Quiñónez M., M., Enríquez A., I. D., Flores M., J. P., Palacios R., K. Y., Olivas S., M. P., Garza O., F y Nájera M., J. A. (2018). Comunidades vegetales en suelo de ecosistema semiárido y su relación con hongos micorrícicos. *Terra Latinoamericana* 36. 381-391. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.401>
- Ramírez-Bravo, O. E., y Hernández-Santino, L. (2016). Diversidad vegetal a lo largo de un gradiente de perturbación en un ecosistema semi-árido en el

- Centro de México. *Acta Botánica mexicana*, (117), 11–25.  
<https://doi.org/10.21829/abm117.2016.1164>
- Restovich, S., Andriulo, A. y Portela, S. (2018). Mezcla de cultivos de cobertura: aumento de la diversidad de especies y multibeneficios agroecosistémicos. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/2733>
- Reyes R., W. J. (2014). Procesos de compactación en un suelo vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 26 (1), 39-48.
- Robles I., M. C., Bugueño, M., Pefaur, F., Pizarro, L. y Álvarez, J. (2020). Climatología de los espacios áridos: respuestas potenciales al cambio climático. *Dos puntas*. (21).
- Rodríguez S., E. N., Rojo M., G. E., Ramírez V., B., Martínez R., R., Cong H., M. D., Medina T., S. M. y Piña R., H. H. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) En México. *Ra Ximhai*. 10 (3), 173-193.
- Romero, R., Silva, P. y Seguel, O. (2016). Anegamiento y su efecto sobre la fisiología, crecimiento y rendimiento de trigo en zonas mediterráneas manejadas en cerolabranza. *Agro Sur*, 44(1), 47–57.  
<https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n1-05>
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Tamayo O., C. V. y Alegre O., J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1) e3287.  
<https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Torres, J., Gutierrez, J. A. y Beltran, H. A. (2020). Compactación, Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18–22. <https://doi.org/10.36436/24223484.225>
- Vía orgánica (2020). Un billón de agaves. [viaorganica.org/un-billon-de-agaves](http://viaorganica.org/un-billon-de-agaves)
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M. & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International soil and water conservation research*.  
<https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2023.03.002>
- Zamora-Zamora, T., Bello-Alarcón, A. y Villavicencio-Velásquez, M. (2019). Caracterización del aceite de semilla de la especie *Prosopis juliflora* ecuatoriana. *Revista Ciencia Unemi*, 12 (31), 30-39

## 4. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL SEMIÁRIDO GUANAJUATENSE<sup>3</sup>

### 4.1. Resumen

Los sistemas agroforestales se han implementado en el semiárido como alternativa para mitigar el deterioro ambiental, como en el caso del rancho agroecológico de Vía Orgánica en el semiárido guanajuatense, donde se desarrolló la investigación, con la finalidad de evaluar la biodiversidad presente y el desarrollo morfológico de los componentes de un sistema agrosilvopastoril (ASP) y uno silvopastoril (SSP) establecidos en 2014. Se utilizó el índice de agrobiodiversidad (IDA) y se evaluaron atributos morfológicos; altura y área de copa en árboles y número de pencas en las suculentas. Además, se realizó un análisis de varianza ( $\alpha = 0.05$ ). En el ASP se encontraron alrededor de 20 especies de las que destacaron la mora, el olivo, los magueyes, nopales, el maíz, girasol, calabaza y diversos pastos, mientras que en el SSP se identificaron más de 80 especies presentes mayormente herbáceas. Las familias con mayor representatividad fueron, Poaceae, Asteraceae, Fabaceae y Asparagaceae. La mora obtuvo valores promedio de 3.15 m y 18.44 m<sup>2</sup> para la altura y cobertura respectivamente, mientras que el olivo obtuvo 1.98 m de altura y 24.32 m<sup>2</sup> de cobertura, en cuanto a las suculentas, el maguey presentó una altura de 0.55 m y el nopal de 0.64 m, con respecto al número de pencas, el maguey presentó una media de 7.73 y el nopal de 24.77. En ambos casos resultaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre grupos de plantas. El IDA resultó para el SSP de 0.64, ligeramente abajo del límite para considerar un sistema como sostenible, mientras que para el ASP fue de 0.71 lo que indica que ambos sistemas necesitan ser intervenidos para mejorar sus índices y tengan la capacidad de ofertar bienes y servicios óptimos ante las condiciones semiáridas.

**Palabras clave:** Agroforestería, Agrobiodiversidad, Vegetación nativa,

---

<sup>3</sup> Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Francisco de Jesús Reyes Sánchez

Supervisora de tesis: Rosa María García Núñez

# CHARACTERIZATION OF AGROFORESTRY SISTEMES IN THE SEMI-ARID REGION OF GUANAJUATO<sup>4</sup>

## Abstract

Agroforestry systems have been implemented in semi-arid regions as an alternative to mitigate environmental degradation, as in the case of the agroecological ranch of Via Organica in the semi-arid region of Guanajuato, where this research was conducted. The objective was to evaluate the existing biodiversity and the morphological development of components within an agrosilvopastoral system (ASP) and a silvopastoral system (SSP), both established in 2014. The agro-biodiversity index (ABI) was used, along with assessments of species richness and measurements of tree height, canopy area, and the numbers de cladodes in succulents. Additionally, an analysis of variance ( $\alpha = 0.05$ ) was performed. In the ASP, approximately 20 species were found, with mulberry, olive, maguey, prickly pear cactus, maize, sunflower, squash, and various grasses standing out. In contrast, over 80 species were identified in the SSP, mostly herbaceous. The most representative families were Poaceae, Asteraceae, Fabaceae, and Asparagaceae. Mulberry trees had average values of 3.15 m in height and 18.44 m<sup>2</sup> in canopy coverage, while olive trees measured 1.98 m in height and 24.32 m<sup>2</sup> in coverage. Among the succulents, maguey showed an average height of 0.55 m and prickly pear cactus 0.64 m. In terms of the number of cladodes, maguey had an average of 7.73 and prickly pear cactus 24.77. In both cases, statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ ) were found between plant types. The ABI for the SSP was 0.64, slightly below the threshold for a system to be considered sustainable, whereas the ASP scored 0.71, indicating that both systems require intervention to improve their biodiversity indices and enhance their capacity to provide optimal goods and ecosystem services under semi-arid conditions.

**Keywords:** Agroforestry, Agrobiodiversity, Native vegetation

---

<sup>4</sup> Thesis. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.  
Author: Francisco de Jesús Reyes Sánchez  
Advisor: Rosa María García Núñez

## 4.2 Introducción

En el mundo se reconocen diferentes fenómenos que históricamente han afectado la calidad de los recursos naturales y la diversidad biológica del planeta (Villanueva, Lojka y Cardona, 2023), aunado a condiciones climáticas adversas; altas temperaturas y escasas lluvias se magnifica la fragilidad y vulnerabilidad de los sistemas, tal es el caso de las zonas áridas y semiáridas (Bhattacharyya, et al., 2015; Karlen y Rice, 2015). A pesar de su aspecto desolado y aparentemente poco productivo, estos ecosistemas albergan una gran diversidad biológica con interacciones de intercambio de materia y energía entre las especies y el medio abiótico, lo que proporciona múltiples recursos y servicios ambientales (Montaño, et al., 2016; Klich, 2017).

En los ecosistemas semiáridos, la vegetación soporta condiciones climáticas y ambientales muy estresantes lo que impide una cobertura vegetal continua (Quiñónez, et al., 2018), predominan las formas de vida arbustiva, plantas bajas, leñosas y muy ramificadas desde la base y cada año en la temporada lluviosa emergen las herbáceas que bajo estas condiciones edafoclimáticas producen altas concentraciones de compuestos secundarios que las convierten en plantas con un alto valor nutritivo para el ganado (Boza, Robles y Gonzáles, 2014; Arriola-Padilla, 2015).

Generalmente, el manejo de este tipo de agroecosistemas es inadecuado, lo que tiene un impacto directo sobre la vegetación y eso afecta el equilibrio ecológico, reduciendo tanto la diversidad biológica como la funcionalidad del ecosistema (Villaseñor, Ortiz, Ramírez-Barrios y Murguía-Romero, 2023), esto a su vez, compromete la provisión de bienes y servicios ambientales esenciales para satisfacer las necesidades básicas de la población (Cetzal-Ix, 2018).

Ante esta problemática, los sistemas agroforestales han emergido como una estrategia clave para promover la sostenibilidad agrícola en paisajes degradados, los cuales cada vez más se expanden en nuestro país (Mazo, Eliecer y Castro, 2016), estos sistemas no solo mejoran la productividad de la tierra, sino que

también fomentan la conservación de la biodiversidad, optimizan el uso de los recursos naturales y aumentan la resiliencia de los ecosistemas y agroecosistemas (Villanueva, Lojka y Cardona, 2023).

En los sistemas agroforestales se establecen componentes, principalmente nativos de uso múltiple como árboles y arbustos con cultivos agrícolas y animales que interactúan en la misma superficie bajo diferentes esquemas de plantación (Delgado, Ballesteros y Arellano, 2022) y ofrecen múltiples beneficios a los habitantes de estas regiones para subsistir (Tamayo y Alegre, 2022).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue caracterizar dos sistemas agroforestales establecidos en una zona degradada del semiárido guanajuatense, los cuales forman parte de un sistema agroecológico en Vía Orgánica. En estos sistemas se implementaron diversas combinaciones de componentes como árboles, arbustos, animales y cultivos, los cuales contribuyen al sistema de manera integral, proporcionando bienes de consumo de forma escalonada durante todo el año, a la vez que generan servicios ambientales.

### **4.3 Materiales y métodos**

#### **4.3.1 Descripción geográfica del área de estudio**

El estudio se realizó en el rancho agroecológico Vía Regenerativa y Orgánica de México A. C., localizado al sur del municipio de San Miguel de Allende, Gto., entre las coordenadas geográficas 20° 48' 51" y 20° 49' 14" de latitud Norte y entre 100° 37' 15" y 100° 37' 39" de longitud Oeste (INEGI, 2010) con altitudes de 2,133 a 2,177 m (Figura 2).

El clima es BS<sub>1</sub>kw, clasificado como semiseco templado con un verano cálido que presenta temperaturas medias de 12 a 18 °C y con una precipitación promedio de 600 mm anuales (García, 2004), la vegetación original es selva baja caducifolia (Rzedowski, 2006), donde predomina la presencia de mezquite (*Neltuma* spp.), huizache (*Acacia farnesiana*), palo azul (*Eysenhardtia polystachya*), magueyes, nopales, múltiples herbáceas de las familias de las

compuestas y fabáceas principalmente. La geología predominante son rocas sedimentarias, conglomerados y areniscas; los suelos presentes en la región son del grupo vertisol (INEGI,2010).

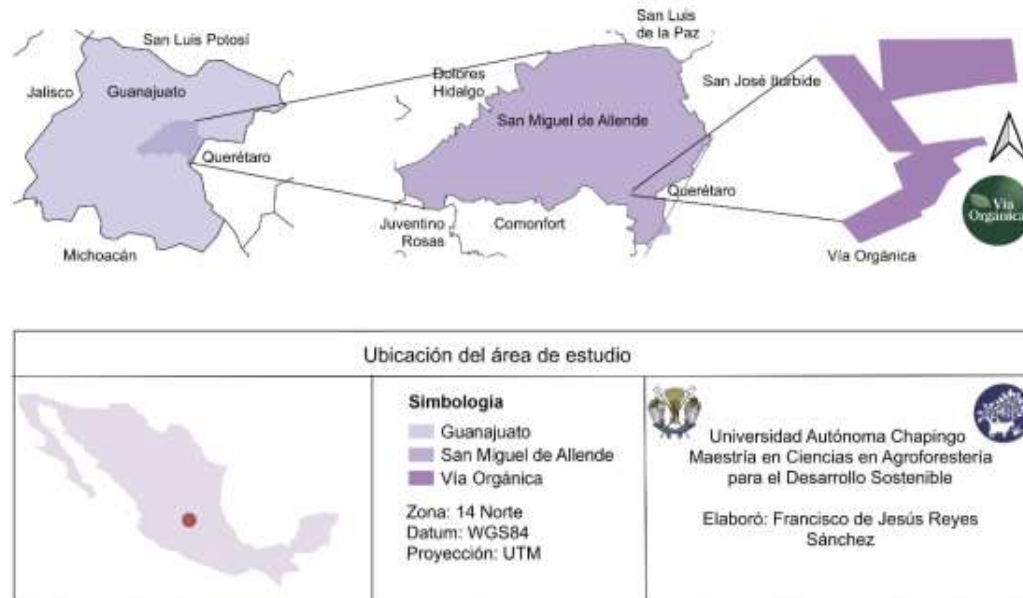


Figura 2. Ubicación del área de estudio

#### 4.3.2 Caracterización de los sistemas agroforestales

La caracterización se realizó en dos sistemas agroforestales: el silvopastoril y el agrosilvopastoril. El sistema silvopastoril fue establecido en el año 2014 y abarca una extensión de 13 ha, (Figura 3) en las que los árboles, principalmente mezquites (*Neltuma* sp.) se encuentran dispersos a lo largo del terreno. Las herbáceas presentes son nativas de la región y algunos pastos fueron introducidos al sistema por parte de las aves o el ganado. Además, el sistema también incluye agaves de las especies *Agave americana*, *A. mapisaga*, *A. salmiana*, y *A. crassispinsa*, los cuales fueron establecidos en líneas cada 4 m con el fin de cosechar sus pencas para transformarlas en forraje para el ganado. Este sistema es un sistema trashumante donde pastorean cabras, ovejas, gallinas, algunos caballos y burros, que durante todo el año son integrados de manera secuencial para consumir las herbáceas, principalmente de los géneros *Ipomea*, *Proboscidea*, *Desmanthus*, *Sanvitalia*, *Senecio*, *Melinis*, *Paspalum*, *Panicum*, *Eleusine*.

El sistema agrosilvopastoril fue establecido en el año 2014, se desarrolla en una superficie de 3.5 ha, (Figura 3) establecido con árboles frutales como granada, mora y olivo, agaves de las mismas especies del sistema silvopastoril y nopales, dispuestos en líneas intercaladas cada 3 m; una línea de árboles y una de suculentas. Entre las líneas se siembran cultivos anuales, en el ciclo primavera-verano se establece maíz intercalado con girasol, calabaza, algunas veces cosmos y para el ciclo otoño-invierno siembran garbanzo. Las gallinas y guajolotes entran al terreno a comer una vez que el maíz sobrepasa la altura de las gallinas para que estas no le causen daños y se quedan ahí hasta el final del ciclo, por otro lado, las cabras y ovejas entran a comer entre ciclos productivos, cuando la producción objetivo ya fue retirada del sitio.

La caracterización de los sistemas agroforestales se realizó mediante recorridos de campo en los que se identificaron los principales componentes vegetales de cada sistema.

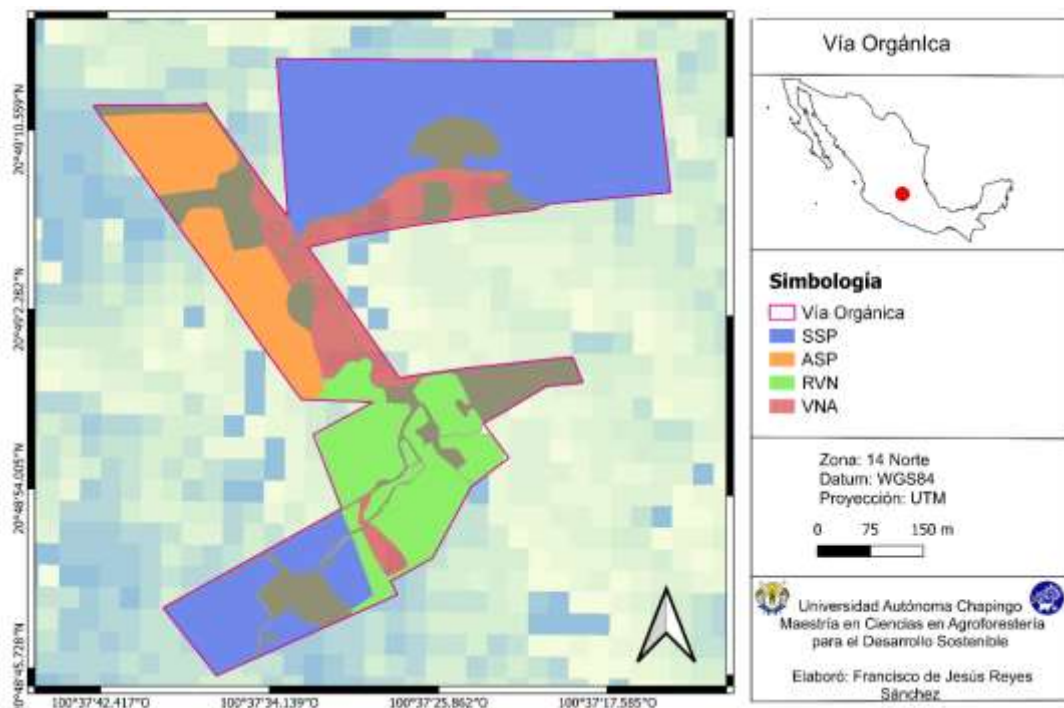


Figura 3. Distribución de los sistemas de estudio

#### **4.3.3 Evaluación de los principales componentes vegetales**

Durante los recorridos de campo se identificó la composición vegetal de los sistemas donde se colectaron e identificaron las especies presentes, así como sus funciones e importancia para los usuarios, así mismo, se evaluó el desarrollo vegetativo a través de la medición morfológica de algunos de sus atributos. En las especies arbóreas se evaluó altura, diámetro de copa y grosor del tallo, mientras que en suculentas se cuantificó número de pencas, así como el área de cobertura. Posterior a eso, se realizó un análisis de varianza seguido de una comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

#### **4.3.4 Determinación del índice de agrobiodiversidad**

La determinación del índice de agrobiodiversidad se realizó tomando como base la metodología propuesta por Leyva y Lores (2012), donde se agrupan los componentes de acuerdo a su función e importancia en índices individuales para posteriormente determinar el índice general utilizando la Ecuación (1).

$$IDA = \frac{IAH + IAA + IMS + ICOM}{4} \quad (1)$$

Donde:

IDA: Índice de agrobiodiversidad

IAH: Índice para la alimentación humana

IAA: Índice para la alimentación animal

IMS: Índice para el mejoramiento del suelo

ICOM: Índice de biodiversidad complementaria

Los índices individuales son un conjunto de categorías que inciden en algún elemento del sistema como el suelo, el ganado y la sociedad. Cada índice se conforma por un número de categorías diferentes donde se agrupan los elementos de acuerdo con su función principal dentro del sistema.

Estos índices se calcularon utilizando las Ecuaciones (2), (3), (4) y (5), las cuales determinan el índice para la alimentación humana (IAH), la alimentación animal (IAA), el mejoramiento del suelo (IMS) y el de la biodiversidad complementaria (ICOM).

$$IAH = \frac{Vi(I) + Vi(II) + Vi(III) + Vi(IV) + Vi(V) + Vi(VI)}{18} \quad (2)$$

$$IAA = \frac{Vi(VII) + Vi(VIII)}{6} \quad (3)$$

$$IMS = \frac{Vi(IX) + Vi(X)}{6} \quad (4)$$

$$ICOM = \frac{Vi(XI) + Vi(XII) + Vi(XIII) + Vi(XIV)}{12} \quad (5)$$

De las ecuaciones anteriores, los numeradores corresponden a la media del valor de importancia de cada categoría incluida en el índice, mientras que los denominadores resultan de la multiplicación del valor de importancia máximo por el número de categorías que alberga el índice.

Para la clasificación de los componentes existentes en los sistemas agroforestales se utilizaron 16 categorías de clasificación, esto es que, se anexaron dos categorías más a las 14 propuestas en la metodología original (Leyva y Lores, 2012), ya que se consideraron componentes adicionales de los sistemas como la producción del estiércol fresco de los animales que pastorean y la producción de forrajes alternativos utilizando las pencas fermentadas de los agaves, es por esto que se anexó la categoría de los forrajes alternativos al índice para la alimentación animal (IAA) y el estiércol fresco al índice para el mejoramiento del suelo (IMS) ( Cuadro 1).

Cuadro 1. Categorías de clasificación de la agrobiodiversidad modificadas para sistemas agroforestales del semiárido

| Índices                                                    | Grupos      | Componentes                                   |
|------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------|
| <b>IAH</b><br>Biodiversidad para la alimentación humana    | <b>I</b>    | Alimentos de origen animal                    |
|                                                            | <b>II</b>   | Alimentos proteicos de origen vegetal         |
|                                                            | <b>III</b>  | Energéticos (Cereales, raíces, tubérculos)    |
|                                                            | <b>IV</b>   | Energéticos (oleaginosas)                     |
|                                                            | <b>V</b>    | Vegetales                                     |
|                                                            | <b>VI</b>   | Frutales                                      |
| <b>IAA</b><br>Biodiversidad para la alimentación animal    | <b>VII</b>  | plantas leguminosas y cereales (Arvenses)     |
|                                                            | <b>VIII</b> | Pastos                                        |
|                                                            | <b>IX</b>   | Forrajes alternativos                         |
| <b>IAS</b><br>Biodiversidad para el mejoramiento del suelo | <b>X</b>    | Abonos verdes, residuos de cosecha, hojarasca |
|                                                            | <b>XI</b>   | Compostas, humus, biofertilizantes            |
|                                                            | <b>XII</b>  | Estiércol fresco                              |
| <b>ICOM</b><br>Biodiversidad complementaria                | <b>XIII</b> | Salud corporal (Medicinales, otros)           |
|                                                            | <b>XIV</b>  | Ornamentales, fines religiosos, otros.        |
|                                                            | <b>XV</b>   | Complementarias (Melíferas, repelentes)       |
|                                                            | <b>XVI</b>  | Otros fines (Maderables)                      |

Fuente: Leyva y Lores (2012) modificado para los sistemas agroforestales

Con la adición de las nuevas categorías, las fórmulas para determinar el IAA y el IMS fueron modificadas quedando representadas en las Ecuaciones (6) y (7) respectivamente.

$$IAA = \frac{Vi(VII) + Vi(VIII) + Vi(IX)}{9} \quad (6)$$

$$IMS = \frac{Vi(X) + Vi(XI) + Vi(XII)}{9} \quad (7)$$

El número de las categorías correspondientes al ICOM también fue modificado y quedó representado en la Ecuación (8).

$$ICOM = \frac{Vi(XIII) + Vi(XIV) + Vi(XV) + Vi(XVI)}{12} \quad (8)$$

Leyva y Lores (2012) proponen una única función de los elementos del sistema para calcular el IDA, sin embargo, los elementos establecidos en los sistemas agroforestales son considerados multifuncionales, por lo que, a los elementos principales; agaves, mezquites, moras, maíz, girasol, gallinas y borregos se les consideró también una función secundaria, la cual presentó un valor de importancia menor al de la función principal.

## **4.4 Resultados**

### **4.4.1 Composición vegetal de los sistemas agroforestales**

La selección de los componentes para los sistemas agroforestales establecidos en Vía Orgánica se basó en la función específica de cada elemento de acuerdo a los requerimientos de los sistemas agroforestales del rancho agroecológico enfatizando en el uso de especies nativas

#### **Composición vegetal del sistema agrosilvopastoril**

Los elementos vegetativos presentes en el sistema agrosilvopastoril son frutales y plantas nativas para su preservación, la familia más representada en el sistema fue la Poaceae con siete especies; una de maíz y seis especies de pastos, seguido de la Asparagaceae con cuatro especies de magueyes, la Fabaceae con tres especies, la Roseaceae y Cactaceae con dos especies cada una y otras familias como la Moraceae, Asteraceae, Cucurbitaceae, Oleaceae y Punicoideae están representadas con una sola especie como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Composición vegetal del sistema agrosilvopastoril

| Nombre común | Nombre científico         | Familia       | Forma biológica |
|--------------|---------------------------|---------------|-----------------|
| Mora         | <i>Morus alba</i>         | Moraceae      | Árbol           |
| Olivo        | <i>Olea europaea</i>      | Oleaceae      | Árbol           |
| Granada      | <i>Punica granatum</i>    | Punicoideae   | Arbusto         |
| Mezquite     | <i>Neltuma</i> sp.        | Fabaceae      | Arbusto         |
| Huizache     | <i>Acacia farnesiana</i>  | Fabaceae      | Arbusto         |
| Ciruelo      | <i>Prunus domestica</i>   | Rosaceae      | Árbol           |
| Durazno      | <i>Prunus pérsica</i>     | Rosaceae      | Árbol           |
| Maíz         | <i>Zea mays</i>           | Poaceae       | Herbácea        |
| Girasol      | <i>Helianthus</i> sp.     | Asteraceae    | Herbácea        |
| Calabaza     | <i>Cucurbita</i> sp.      | Cucurbitaceae | Herbácea        |
| Garbanzo     | <i>Cicer arietinum</i>    | Fabaceae      | Herbácea        |
| Nopal        | <i>Opuntia</i> spp.       | Cactaceae     | Suculenta       |
| Xoconostle   | <i>Opuntia joconostle</i> | Cactaceae     | Suculenta       |
| Maguey       | <i>Agave mapisaga</i>     | Asparagaceae  | Suculenta       |
| Maguey       | <i>Agave salmiana</i>     | Asparagaceae  | Suculenta       |
| Maguey       | <i>Agave crassispina</i>  | Asparagaceae  | Suculenta       |
| Maguey       | <i>Agave americana</i>    | Asparagaceae  | Suculenta       |
| Pasto        | <i>Hilaria</i> sp.        | Poaceae       | Herbácea        |
| Pasto        | <i>Bothriochloa</i> sp.   | Poaceae       | Herbácea        |
| Pasto        | <i>Eleusine indica</i>    | Poaceae       | Herbácea        |
| Pasto        | <i>Chloris</i> sp.        | Poaceae       | Herbácea        |
| Pasto        | <i>Bothriochloa</i> sp.   | Poaceae       | Herbácea        |
| Pasto        | <i>Bromus</i> sp.         | Poaceae       | Herbácea        |

De los árboles establecidos en este sistema la mora (n = 16) fue la que presentó la mayor altura promedio con 3.16 m, en comparación con la granada (n = 7) que solo alcanza una altura promedio de 1.54 m. El olivo (n = 38) fue la especie con mayor diámetro de copa y cobertura; 5.41 m y 24.32 m<sup>2</sup> respectivamente, en

comparación con el ciruelo (n = 3) que apenas obtuvo un diámetro de copa de 0.78 m y una cobertura de 0.61 m<sup>2</sup> (Cuadro 3).

Cuadro 3. Métricas básicas de los principales componentes frutales del sistema agrosilvopastoril.

|         | Altura (m)              |                 | Ø copa <sup>x</sup> (m) |       | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |       |
|---------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|         | Media ± DE <sup>z</sup> | CV <sup>y</sup> | Media ± DE              | CV    | Media ± DE                  | CV    |
| Mora    | 3.16 ± 0.54             | 17.24           | 4.75 ± 0.98             | 20.55 | 18.44 ± 7.56                | 40.99 |
| Olivo   | 1.98 ± 0.42             | 21.17           | 5.41 ± 1.33             | 24.54 | 24.32 ± 12.42               | 51.08 |
| Granada | 1.54 ± 0.43             | 27.79           | 1.21 ± 0.38             | 31.44 | 1.26 ± 0.74                 | 59.17 |
| Ciruelo | 1.79 ± 0.38             | 21.43           | 0.78 ± 0.52             | 66.43 | 0.61 ± 0.73                 | 119.3 |

<sup>z</sup>DE: Desviación estándar, <sup>y</sup>CV: Coeficiente de variación (%), <sup>x</sup>Ø copa: Diámetro de copa

De acuerdo a los atributos morfológicos evaluados se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los árboles; con respecto a la altura, la mora sobresale en comparación con el resto, mientras que, en el diámetro de copa y la cobertura, la mora y el olivo fueron estadísticamente similares pero contrastantes a la granada y el ciruelo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de varianza de los atributos morfológicos de los árboles

|         | Altura (m) |    | Ø copa <sup>z</sup> (m) |   | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |   |
|---------|------------|----|-------------------------|---|-----------------------------|---|
|         | Media      |    | Media                   |   | Media                       |   |
| Mora    | 3.16       | a  | 4.75                    | a | 18.44                       | a |
| Olivo   | 1.98       | b  | 5.41                    | a | 24.32                       | a |
| Granada | 1.54       | bc | 1.21                    | b | 1.26                        | b |
| Ciruelo | 1.79       | c  | 0.78                    | b | 0.61                        | b |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>z</sup>Ø copa: Diámetro de copa

Con respecto a las crasuláceas, los nopales (n = 48) presentaron 24 pencas, muy superior a los magueyes (n = 159) que solo tuvieron 7. En cuanto a la altura de los magueyes y los nopales presentes apenas superaron el medio metro con coberturas de 0.26 a 0.47 m<sup>2</sup> (Cuadro 5).

Cuadro 5. Métricas básicas de los agaves y nopales establecidos en el sistema agrosilvopastoril.

|       | Altura (m)              |                 | Pencas        |       | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |        |
|-------|-------------------------|-----------------|---------------|-------|-----------------------------|--------|
|       | Media ± DE <sup>z</sup> | CV <sup>y</sup> | Media ± DE    | CV    | Media ± DE                  | CV     |
| Nopal | 0.65 ± 0.20             | 30.46           | 24.77 ± 16.23 | 65.50 | 0.47 ± 0.46                 | 99.25  |
| Agave | 0.55 ± 0.22             | 39.77           | 7.74 ± 3.07   | 39.74 | 0.26 ± 0.27                 | 104.62 |

<sup>z</sup>DE: Desviación estándar, <sup>y</sup>CV: coeficiente de variación (%)

Con respecto a las suculentas, en las tres evaluaciones realizadas se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ), la mayor diferencia se identificó en el número de pencas, mientras el agave se poda constantemente, los nopales, solo los tiernos son cosechados y eso también influye en la cobertura de estas plantas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Análisis de varianza de los atributos morfológicos evaluados de las suculentas

|       | Altura (m) |   | Pencas |   | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |   |
|-------|------------|---|--------|---|-----------------------------|---|
|       | Media      |   | Media  |   | Media                       |   |
| Nopal | 0.65       | a | 24.77  | a | 0.47                        | a |
| Agave | 0.55       | b | 7.74   | b | 0.26                        | b |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

### Composición vegetal del sistema silvopastoril

El sistema silvopastoril es un sistema trashumante, integrado por árboles, arbustos, herbáceas, y cactáceas nativas de la región. El objetivo de este sistema, es proveer alimento para el ganado, por lo que está dominado por plantas herbáceas, las cuales han prevalecido a pesar de las alteraciones y se han enriquecido por los animales al transportar semillas de un sistema a otro.

En este sistema se identificaron 90 especies vegetales distribuidas en 23 familias, de las cuales las más representadas fueron; Poaceae con 20 especies identificadas de las cuales destacan en su mayoría pastos; *Eleusine indica*, *Avena fatua* y *Rhynchelytrum repens*, entre otras; Asteraceae con 13 especies destacando *Artemisa campestris*, *Tagetes lucida*, *Helianthus petiolaris*, entre otras; Fabaceae con 10 especies, de las cuales con mayor representatividad están

*Neltuma* sp., *Desmodium intertum*, *Mimosa monancistra*, entre otras; Asparagaceae (n = 181) con seis, de las cuales algunas son: *Agave americana*, *Agave mapisaga* y *Agave salmiana*; en cuanto a los nopales, fueron dos especies; *Opuntia joconostle* y *Opuntia* sp. con respecto a los arbustos se identificaron dos especies; *Acacia farnesiana* y *Mimosa* sp. y para los árboles, únicamente se encontró una especie, la cual fue el mezquite (n = 134) como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación de los elementos vegetales agrupados por familia presentes en el sistema silvopastoril.

| Familia        | Número de especies identificadas | Forma biológica     |
|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Poaceae        | 20                               | Herbáceas           |
| Asteraceae     | 13                               | Herbáceas           |
| Fabaceae       | 10                               | Herbáceas y leñosas |
| Asparagaceae   | 6                                | Agaves              |
| Cactaceae      | 3                                | Cactus              |
| Cyperaceae     | 3                                | Herbáceas           |
| Lythraceae     | 2                                | Herbáceas           |
| Vervenaceae    | 2                                | Herbáceas           |
| Onagraceae     | 2                                | Herbáceas           |
| Convolvulaceae | 2                                | Herbáceas           |
| Malvaceae      | 2                                | Herbáceas           |
| Laminaceae     | 2                                | Herbáceas           |
| Asparagaceae   | 2                                | Herbáceas           |
| Loasaceae      | 2                                | Herbáceas           |
| Oxalidaceae    | 2                                | Herbáceas           |
| Phyllanthaceae | 1                                | Herbáceas           |
| Marthyniaceae  | 1                                | Herbáceas           |
| Solanaceae     | 1                                | Herbáceas           |
| Euphorbiaceae  | 1                                | Herbáceas           |
| Liliaceae      | 1                                | Herbáceas           |

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| Commelinaceae | 1 | Herbáceas |
| Portulacaceae | 1 | Herbáceas |
| Brasicae      | 1 | Herbáceas |

En este sistema se establecieron agaves, los cuales tienen una altura media de 0.48 m y una cobertura de 0.25 m<sup>2</sup>, mientras que los mezquites presentaron una altura media de 1.99 m, con un diámetro de copa y cobertura de 1.95 m y 3.28 m<sup>2</sup> respectivamente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Métricas básicas de los magueyes y mezquites establecidos en el sistema silvopastoril

| Agaves    | Pencas                  |                 | Altura (m)              |       | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |       |
|-----------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|           | Media ± DE <sup>z</sup> | CV <sup>y</sup> | Media ± DE              | CV    | Media ± DE                  | CV    |
|           | 7.96 ± 2.49             | 31.23           | 0.48 ± 0.15             | 30.39 | 0.25 ± 0.18                 | 70.43 |
| Mezquites | Altura (m)              |                 | Ø copa <sup>x</sup> (m) |       | Cobertura (m <sup>2</sup> ) |       |
|           | Media ± DE              | CV              | Media ± DE              | CV    | Media ± DE                  | CV    |
|           | 1.99 ± 0.54             | 27.19           | 1.95 ± 0.61             | 31.09 | 3.28 ± 1.98                 | 60.29 |

<sup>z</sup>DE: Desviación estándar, <sup>y</sup>CV: Coeficiente de variación (%), <sup>x</sup>Ø copa: Diámetro de copa

#### 4.4.2 índice de agrobiodiversidad de los sistemas agroforestales

Para el cálculo de la agrobiodiversidad presente en los sistemas agroforestales se consideraron todas las especies presentes asumiendo el valor de juicio considerado por Leyva y Lores (2012) de 1 a 3, dónde 1 corresponde a la especie con menor utilidad y el 3 a la que se considera con una utilidad máxima enfocada a cumplir los objetivos dentro del rancho agroecológico. Este índice de agrobiodiversidad muestra la diversidad e importancia de los elementos que constituyen el sistema como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Diversidad de los sistemas agroforestales con respecto al índice individual al que pertenecen conforme la función principal que desempeñan.

| Sistema           | Elemento | Función principal | Grupo | Índice           |
|-------------------|----------|-------------------|-------|------------------|
| Agrosilvopastoril | Maguey   | Aporte al suelo   | XI    | IMS <sup>z</sup> |
|                   | Maguey   | Consumo animal    | IX    | IAA <sup>y</sup> |
|                   | Nopal    | Consumo humano    | V     | IAH <sup>x</sup> |

|               |                         |                 |      |                   |
|---------------|-------------------------|-----------------|------|-------------------|
|               | Maíz                    | Consumo humano  | III  | IAH               |
|               | Maíz                    | Aporte al suelo | X    | IMS               |
|               | Girasol                 | Consumo humano  | IV   | IAH               |
|               | Girasol                 | Aporte al suelo | X    | IMS               |
|               | Garbanzo                | Consumo humano  | II   | IAH               |
|               | Mora                    | Frutal          | VI   | IAH               |
|               | Mora                    | Aporte al suelo | X    | IMS               |
|               | Olivo                   | Ornamental      | XIV  | ICOM <sup>w</sup> |
|               | Mezquite                | Forraje         | VII  | IAA               |
|               | Mezquite                | Aporte al suelo | X    | IMS               |
|               | Granada                 | Frutal          | VI   | IAH               |
|               | Huizache                | Melífera        | XV   | ICOM              |
|               | Ciruela                 | Frutal          | VI   | IAH               |
|               | Durazno                 | Frutal          | VI   | IAH               |
|               | Chabacano               | Frutal          | VI   | IAH               |
|               | Gallinas                | Consumo humano  | I    | IAH               |
|               | Gallinas                | Aporte al suelo | XII  | IMS               |
|               | Guajolote               | Incubadoras     | XVI  | ICOM              |
|               | Gansos                  | Ornamental      | XIV  | ICOM              |
|               | Patos                   | Ornamental      | XIV  | ICOM              |
|               | Cerdos                  | Consumo humano  | I    | IAH               |
|               | Borregos                | Consumo humano  | I    | IAH               |
|               | Borregos                | Aporte al suelo | XII  | IMS               |
|               | Cabras                  | Consumo humano  | I    | IAH               |
|               | <i>Hilaria</i> sp.      | Consumo animal  | VIII | IAA               |
|               | <i>Eleusine</i> sp.     | Consumo animal  | VIII | IAA               |
|               | <i>Bromus</i> sp.       | Consumo animal  | VIII | IAA               |
|               | <i>Chloris</i> sp.      | Consumo animal  | VIII | IAA               |
|               | <i>Bothriochloa</i> sp. | Consumo animal  | VIII | IAA               |
| Silvopastoril | Maguey                  | Consumo animal  | IX   | IAA               |
|               | Maguey                  | Aporte al suelo | XI   | IMS               |

|                            |                 |     |      |
|----------------------------|-----------------|-----|------|
| Nopal                      | Consumo humano  | V   | IAH  |
| Xoconostle                 | Consumo humano  | VI  | IAH  |
| Cactus columnar            | Ornamental      | XIV | ICOM |
| Mezquite                   | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| Mezquite                   | Consumo animal  | VII | IAA  |
| Uña de gato                | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| Ovejas                     | Consumo humano  | I   | IAH  |
| Ovejas                     | Aporte al suelo | XII | IMS  |
| Cabras                     | Consumo humano  | I   | IAH  |
| Burros                     | Ornamental      | XIV | ICOM |
| Caballos                   | Ornamental      | XIV | ICOM |
| Abejas                     | Consumo humano  | I   | IAH  |
| <i>Lythrum</i> sp.         | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Phyllanthus</i> sp.     | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Palafoxia</i> sp.       | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Adenophyllum</i> sp.    | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Euphorbia</i> sp.       | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Artemisa campestris</i> | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Oenothera</i> sp.       | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Vicia</i> sp.           | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Stachytarpheta</i> sp.  | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Artemisa</i> sp.        | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Proboscidea</i> sp.     | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Physalis</i> sp.        | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Mentzelia incisa</i>    | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Oenothera gaura</i>     | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Ipomea</i> sp.          | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Cuphea</i> sp.          | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Desmanthus</i> sp.      | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Verbesina</i> sp.       | Aporte al suelo | X   | IMS  |
| <i>Anoda acerifolia</i>    | Aporte al suelo | X   | IMS  |

|                           |                 |      |     |
|---------------------------|-----------------|------|-----|
| <i>Oxalis</i> sp.         | Aporte al suelo | X    | IMS |
| <i>Ipomea alba</i>        | Aporte al suelo | X    | IMS |
| <i>Bouchea</i> sp.        | Aporte al suelo | X    | IMS |
| <i>Oxalis decaphylla</i>  | Aporte al suelo | X    | IMS |
| <i>Indigofera</i> sp.     | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Mimosa</i> sp.         | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Desmodium</i> sp.      | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Crotdaria</i> sp.      | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Synedrella</i> sp.     | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Baltimora</i> sp.      | Consumo animal  | VII  | IAA |
| <i>Hilaria rigida</i>     | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Stachys</i> sp.        | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Melinis</i> sp.        | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Sorgum</i> sp.         | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Dichanthium</i> sp.    | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Setaria pumila</i>     | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Echinochloa</i> sp.    | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Eleusine</i> sp.       | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Avena</i> sp.          | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Bromus sterilis</i>    | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Chloris barbata</i>    | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Digitaria</i> sp.      | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Chloris gayana</i>     | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Cyperus longus</i>     | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Panicum</i> sp.        | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Commelina</i> sp.      | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Cyperus</i> sp.        | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Cyperus esculentus</i> | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Paspalum</i> sp.       | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Bothriochloa</i> sp.   | Consumo animal  | VIII | IAA |
| <i>Eustachys</i> sp.      | Consumo animal  | VIII | IAA |

|                         |                |      |      |
|-------------------------|----------------|------|------|
| <i>Stipa</i> sp.        | Consumo animal | VIII | IAA  |
| <i>Distichlis</i> sp.   | Consumo animal | VIII | IAA  |
| <i>Sporobolus</i> sp.   | Consumo animal | VIII | IAA  |
| <i>Setaria</i> sp.      | Consumo animal | VIII | IAA  |
| <i>Eruca</i> sp.        | Consumo animal | VIII | IAA  |
| <i>Tagetes</i> sp.      | Medicinal      | XIII | ICOM |
| <i>Anoda</i> Sp.        | Medicinal      | XIII | ICOM |
| <i>Salvia</i> Sp.       | Medicinal      | XIII | ICOM |
| <i>Heliantus</i> Sp.    | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Grindelia</i> Sp.    | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Milla</i> Sp.        | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Echeandia</i> Sp.    | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Calochorthus</i> sp. | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Senecio</i> sp.      | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Cosmos</i> sp.       | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Sanvitalia</i> sp.   | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| <i>Mentzelia</i> sp.    | Ornamental     | XIV  | ICOM |
| Verdolaga               | Consumo humano | V    | IAH  |

<sup>z</sup>IMS: Índice de mejoramiento del suelo, <sup>y</sup>IAA: Índice para la alimentación animal,

<sup>x</sup>IAH: Índice para la alimentación humana, <sup>w</sup>ICOM: Índice de biodiversidad complementario

La diversidad agrícola del sistema agrosilvopastoril que resultó fue de seis especies animales, de las cuales las principales son las gallinas y los borregos; ocho leñosas, principalmente moras, olivos y mezquites; siete suculentas, entre nopales y magueyes, cinco cultivos anuales de los que destacan el maíz, girasol y garbanzo y cinco especies de pastos de las que sobresalen *Bromus* sp., *Eleusine* sp. y *Hilaria* sp. La diversidad agrícola del sistema silvopastoril se concentró en las plantas herbáceas contrariamente a los árboles, donde solo se encontraron mezquites, aquí también se encuentran las mismas especies de magueyes que en el agrosilvopastoril, en cuanto a los animales que pastorean en este sistema destacan borregos y cabras (Cuadro 9).

El cálculo de los subíndices y del índice de agrobiodiversidad en el sistema agrosilvopastoril y silvopastoril se presentan en el Cuadro 10. Los índices individuales reflejan la importancia de los elementos dentro de los sistemas, por lo que son importantes para las intervenciones exitosas, especialmente en condiciones semiáridas.

Los subíndices mejor evaluados fueron el IMS en el sistema agrosilvopastoril con un valor de 0.92 mientras que en el silvopastoril fue el IAA con un valor de 0.88, por el contrario, el ICOM fue el de valor más bajo en el agrosilvopastoril con un valor de 0.33 y el IAH en el silvopastoril con un valor de 0.44 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Valor del índice de agrobiodiversidad por sistema y sus subíndices

| Sistema           | Subíndices       |                  |                  |                   | IDA <sup>v</sup> |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                   | IAH <sup>z</sup> | IAA <sup>y</sup> | IMS <sup>x</sup> | ICOM <sup>w</sup> |                  |
| Agrosilvopastoril | 0.88             | 0.7              | 0.92             | 0.33              | 0.71             |
| Silvopastoril     | 0.44             | 0.88             | 0.71             | 0.51              | 0.64             |

<sup>z</sup>IAH: Índice para la alimentación humana, <sup>y</sup>IAA: Índice para la alimentación animal, <sup>x</sup>IMS: Índice para el mejoramiento del suelo, <sup>w</sup>ICOM: Índice de biodiversidad complementaria, <sup>v</sup>IDA: Índice de agrobiodiversidad

El Índice de agrobiodiversidad del sistema agrosilvopastoril fue de 0.71, valor superior al límite propuesto por los autores (0.66) para considerarlo como un sistema sostenible, en contraste, el sistema silvopastoril obtuvo un IDA de 0.64, ligeramente por debajo del límite de sostenibilidad, esto como resultado de los subíndices con elementos escasos y de baja importancia dentro de los sistemas establecidos en el rancho agroecológico.

En el análisis de los índices individuales que componen el IDA, el índice para la alimentación humana es el que resultó con la mayor diferencia entre en los dos sistemas agroforestales, tal como se indica en la Figura 4, esta diferencia radica principalmente en los objetivos de establecimiento de las plantas, mientras un sistema está enfocado a la alimentación del ganado, el otro cumple con una de sus principales funciones, la de proveer alimento para las personas que allí se encuentran, Por otro lado, en ambos sistemas, el índice para el mejoramiento del suelo resultó en valores similares, este resultado refuerza la idea de que los

constantes aportes de material vegetal y estiércol al suelo permiten estabilizar las propiedades del mismo, lo que mejora en gran medida la estabilidad de todo el sistema.

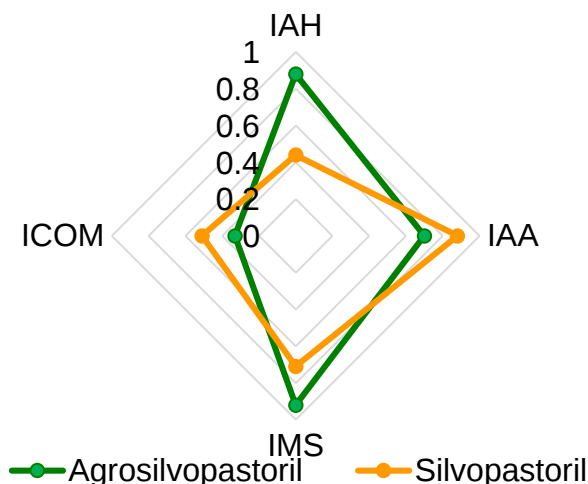


Figura 4. Diagrama radial de los índices individuales de los sistemas evaluados que integran el índice de agrobiodiversidad.

#### 4.5 Discusión

Los sistemas agroforestales implementados en las tierras semiáridas del rancho agroecológico Vía orgánica incentivan el uso de plantas nativas. En el sistema agrosilvopastoril están establecidas alrededor de 20 especies diferentes, las cuales acaparan múltiples usos; forrajeros, frutales, alimenticios, ornamentales, entre otros, con el fin de alcanzar los objetivos del rancho, evidencia similar mostraron Nkomoki, et al., (2025), quienes reconocen que los sistemas agrosilvopastoriles ofrecen una producción diversificada basada en la subsistencia con mayor relevancia en regiones bajo condiciones climáticas adversas, en el mismo tenor, Wolz, et al., (2017) mencionan que este sistema diversifica los ingresos, aumenta la biodiversidad, la eficiencia en el uso del suelo y además genera potencial de adaptación al cambio climático. Del mismo modo, Hernández y Gutiérrez, (2017); Abdoellah et al., (2020) mencionaron como este tipo de sistemas productivos forman estructuras complejas, lo que permite el rescate y aprovechamiento de los recursos locales mediante una amplia variedad de productos para el bienestar social.

Por otra parte, el sistema silvopastoril presenta una amplia diversidad vegetal, con más de 70 especies vegetales, en su mayoría herbáceas enfocadas al consumo animal y aporte de materia orgánica al suelo, de la misma manera lo reportó Roger, (2022) quien identificó que el grupo de plantas más diverso en un sistema silvopastoril fueron las herbáceas por la misma naturaleza del sistema y el aprovechamiento de los recursos naturales, lo que permite conservar y ofrecer un manejo sostenible a la flora, sobre todo a las especies nativas de zonas áridas y semiáridas. Por otra parte, Vazquez, Teutscherova, Lojka, Arango y Pulleman, (2020) mencionaron que la deposición de hojarasca, la actividad y la intensa renovación radicular en estos sistemas propician la estabilidad del suelo lo que permite conservar la biodiversidad y fomentar los servicios ecosistémicos relacionados con el suelo y la vegetación. En otro estudio realizado por Da Oliveira, et al., (2016) mencionaron que un sistema establecido con leñosas y herbáceas enfocado al pastoreo mejora la composición vegetal y orgánica del suelo fortaleciendo significativamente sus propiedades.

La adopción de sistemas silvopastoriles contribuye a asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la ganadería, al tiempo que puede ser una herramienta para disminuir futuros procesos de deforestación (Silva-Olaya, et al., 2022). En un contexto más amplio, Milheiras, et al., (2022); Sharma, Mina y Kumar, (2022) concuerdan que los sistemas agroforestales representan una alternativa para lograr sistemas alimentarios más sostenibles, lo que mejora el bienestar de las comunidades rurales siendo un medio eficaz para abordar el desafío global de la inseguridad alimentaria. De acuerdo con Beauchamp, Woodhouse, Clements y Milner-Gulland, (2018), el bienestar humano es una de las consideraciones para el diseño de políticas exitosas de conservación y medir el impacto que recibe la biodiversidad con las intervenciones realizadas. Esto refleja la importancia de los sistemas agroforestales en la conservación de la biodiversidad para el bienestar humano y su íntima relación con el desarrollo sostenible (Naeem, Chazdon, Duffy, Prager y Worm, 2016).

De las especies que se establecieron y se desarrollan en los sistemas agroforestales, algunos de los elementos principales como los magueyes de las zonas semiáridas, presentaron una altura y cobertura baja, en este sentido Díaz, Yopez y Gotopo, (2018) constataron estos resultados, ya que informaron que los agaves de las zonas semiáridas en otros países alcanzaron una altura máxima de apenas 60 cm y una cobertura de 1.30 m<sup>2</sup> sin embargo, esta se reduce drásticamente cuando los pobladores cosechan las hojas, algo similar ocurre con los nopales. Ambas plantas suculentas fueron establecidas como fuente de forraje alternativo para el ganado en estas zonas, tal como lo reportaron Honorato-Salazar, Aburto y Amezcua-Allieri, (2021); Niechayev, Jones, Rosenthal y Davis, (2019) ya que son plantas con adaptaciones eficientes con los recursos limitados que ofrecen las zonas semiáridas, lo que les permite generar una producción de biomasa comparable con las plantas C3 y C4.

Estas plantas son excelentes restauradores ecológicos gracias a su sistema radical y método de reproducción (Cervera, Leirana-Alcocer y Navarro, 2018). Lo que las posiciona como elementos clave para combatir la desertificación, ya que proporcionan seguridad frente a la sequía, (Cushman, Davis, Yang y Borland, 2015), todo esto bajo un manejo tradicional de la tierra que combina el uso, conservación y restauración de diversas especies de plantas nativas (Cabrera-Toledo, et al., 2020).

En cuanto a los árboles presentes, la morera como componente principal por su multifuncionalidad presentó las evaluaciones morfológicas mejor catalogadas de acuerdo con su objetivo de plantación; frutal y aporte de materia orgánica al suelo, su cobertura fue mayor en comparación con otros frutales, esto se sostiene por Matran, et al., (2023) quienes mencionan que la mora produce una gran cantidad de hojas que sirve como aporte de materia orgánica al suelo fomentando la circulación de nutrientes. Su sistema radical pivotante-rastrero, junto con el contenido de flavonoides en hojas y frutos, según Kobus-Cisowska, et al., (2020) es una de las plantas más beneficiosas para el desarrollo sostenible, con múltiples beneficios ambientales y sociales.

No obstante, los olivos, una planta que inicialmente se estableció con fines productivos, ya que según Bedbabis, et al., (2015) esta planta es tolerante a la sequía, capaz de soportar el estrés hídrico severo, pero si este se prolonga, representa uno de los factores más importantes que limitan la producción, entonces, el olivo en este sistema agrosilvopastoril, sin riego, a expensas de las condiciones ambientales extremas, presenta una producción prácticamente nula, por lo que las labores culturales como las podas, son muy drásticas, lo que reduce fuertemente la cobertura. En otros sistemas productivos, a pesar de ser un árbol o arbusto grueso (Ozturk, et al., 2021) en este rancho agroecológico los árboles han sido de alturas bajas y los tallos no sobrepasan los 15 cm de diámetro. Sin embargo, este sistema productivo es considerado ambientalmente sostenible ya que reduce las cargas ambientales de las prácticas agrícolas que se realizan.

La agrobiodiversidad constituye un componente clave de los sistemas agroforestales evaluados, siendo esencial para la sostenibilidad de los mismos. Esta diversidad no solo contribuye a la alimentación humana y animal, sino que también desempeña un papel crucial en los ámbitos cultural, ambiental y económico (INIAP y FAO, 2017).

Por un lado, el sistema agrosilvopastoril obtuvo un IDA de 0.71 superior al límite para la sostenibilidad que corresponde a un valor de 0.66 mientras que el sistema silvopastoril presentó un IDA de 0.64, ligeramente por debajo, ambos sistemas requieren intervención para aumentar sus valores para fortalecer el sistema. El IDA del sistema agrosilvopastoril requiere especial atención en el ICOM, su bajo valor fue causado por el objetivo de plantación de las especies que conforman el sistema. La mayoría de los elementos del sistema están enfocados a funciones específicas, ya sea alimenticias o forrajeras y los elementos presentes para este índice, además de escasos son de baja importancia (Gravina y Leyva, 2012). La manera de impactar este sistema y mejorarlo es con la introducción de elementos clave que sean de un alto valor de importancia para los usuarios y así diversificar y robustecer el sistema agroforestal.

El sistema silvopastoril es un sistema que aprovecha los elementos herbáceos de la región y algunos introducidos por el ganado, muchas especies no tienen una función definida, por lo que se anexaron al IMS con un valor de importancia medio, entonces al identificar alguna función de estos elementos puede transformarse en elemento de otro índice con mayor importancia.

El IDA para el sistema silvopastoril requiere una atención especial los índices IAH e ICOM. Estos índices necesitan más elementos dentro del sistema para fortalecer todo el conjunto y sean capaces de promover y fortalecer diversos procesos socio ecológicos (Iermanó y Sarandon, 2016), sin embargo, por la naturaleza del sistema se esperaba el IAH fuese bajo, ya que el sistema está enfocado a la alimentación animal, no obstante, se pueden implementar elementos, principalmente frutales que ayuden a mejorar el valor de este índice sin cambiar la naturaleza del sistema.

Para el mejoramiento del ICOM es necesario identificar la multifuncionalidad de los elementos herbáceos nativos con ayuda de las personas de las comunidades locales, ya que reconocen una gran variedad de usos de estas plantas, por todo el bagaje de conocimientos que ha sido transmitido a través de las generaciones (Browne, Morejón y Bonila, 2016). La selección adecuada de los componentes y sus arreglos permiten que se establezcan interacciones, las cuales se van haciendo sostenibles y van a representar un papel fundamental al establecer comunidades vegetales diversas, por lo que, la agrobiodiversidad representa una diversidad biológica dentro de los sistemas agroforestales que contribuye tanto a la estabilidad ecológica como a la seguridad alimentaria (De la Rosa y Fajardo, 2016).

En ambos sistemas, los índices reflejan cómo los propietarios han gestionado y aprovechado el terreno y la biodiversidad disponible. Por lo que, para alcanzar la estabilidad es necesario tener en cuenta el IDA para incorporar elementos que contribuyan a mejorar los índices deficientes. De esta manera, se podrá alcanzar la sostenibilidad en los sistemas agroforestales, transformándolos en sistemas integrales, funcionales y equilibrados (Sánchez, Funes y Cevallos, 2018).

## **4.6 Conclusiones**

La diversidad de los sistemas agroforestales está en función de los objetivos de establecimiento del propio sistema y la diversidad vegetal ya existente en los mismos, esto permite que se siga conservando la vegetación local y al mismo tiempo se aprovechan los recursos que las zonas semiáridas ofrecen permitiendo que establezca un mutualismo entre los elementos naturales y las comunidades rurales que se sitúan en las tierras semiáridas.

En condiciones semiáridas los árboles regularmente son de porte bajo con un sistema radical bastante desarrollado para lograr sobrevivir, por ello el desarrollo de la parte aérea en algunas especies jóvenes fue muy deficiente en contraste con los árboles bien establecidos que ya empiezan a robustecer sus ramas y fustes.

Los sistemas agroforestales se desarrollaron en sitios degradados por lo que fue necesario introducir especies nativas y exóticas para beneficio social y el bienestar animal, sin embargo, existen plantas más importantes que otras, lo que determinó las prácticas de manejo de las mismas y, por ende, el impacto de las especies al suelo. La agrobiodiversidad abarca todos los componentes de la diversidad biológica relevantes para la alimentación, la agricultura y el ecosistema, además incluye al componente sociocultural, pues la diversidad biológica agrícola está en gran parte determinada, por las actividades humanas, saberes tradicionales y las prácticas de gestión, todo esto se presenta con mayor importancia cuando se trata de áreas poco atendidas como los sitios semiáridos.

#### 4.7 Literatura citada

- Abdoellah, O. S., Schneider, M., Nugraha, L. M. Suparman, Y., Voletta, C. T., Withaningsih, S., Parikesit, Heptiyanggit, A. & Hakim, L., (2020). Homegarden commercialization: extent, household characteristics, and effect on food security and food sovereignty in Rural Indonesia. *Sustain Sci* 15, 797–815. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00788-9>
- Arriola-Padilla, V. J., Estrada-Martínez, E., Medellín-Jiménez, R., Gijón-Hernández, A. R., Pichardo-Segura, L. A., Pérez-Miranda, R y Ortega-Rubio, A. (2015). Áreas Naturales Protegidas del Centro de México: degradación y recomendaciones. En: Ortega-Rubio, A., Pinkus-Rendón, M. J., y Espitia-Moreno, I. C. (Editores). *Las Áreas Naturales Protegidas y la Investigación Científica en México*. 337-374.
- Beauchamp, E., Woodhouse, E., Clements, T. & Milner-Gulland, E. J. (2018). “Living a good life”: conceptualizations of well-being in a conservation context in Cambodia. *Ecology and Society*. 23(2).28. <https://doi.org/10.5751/ES-10049-230228>
- Bedbabis, S., Trigui, D., Ben-Ahmed, C., Clodoveo, M. L., Camposeo, S., Vivaldi, G. A. & Ben-Rouina, B. (2015). Long-terms effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil, yield and olive oil quality. *Agricultural Water Management*. 160. 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.023>
- Bhattacharyya, R., Ghosh, B. N., Mishra, P. K., Mandal, B., Rao, C. S., Sarkar, D., Das, K., Anil, K. S., Lalitha, M. & Hati, K. M. (2015). Soil Degradation in india: Challenges and Potential Solutions. *Sustainability* 7(4) pp. 3528-3570. <https://doi.org/10.3390/su7043528>
- Boza, J., Robles, A. B. y González R., J. L. (2014). El papel de la ganadería en las zonas áridas de Andalucía. En Junta de Andalucía y Consejería de agricultura y pesca. (Eds), *La ganadería Andaluza en el siglo XXI*. 1, 241-266.
- Browne, E. P., Morejón, M. y Bonila, M. (2016). Agrobiodiversidad en la cooperativa de Cayon-Phillips. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 4(1), 94-101. [https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio\\_Ganadero\\_Tomo\\_I.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio_Ganadero_Tomo_I.pdf)
- Cabrera-Toledo, D., Vargas-Ponce, O., Ascencio-Ramírez, S., Valadez-Sandoval, L. M., Pérez-Alquicira, J., Morales-Saavedra., J. y Huerta-Galván, O. F. (2020) Variación morfológica y genética en monocultivos, sistemas forestales y poblaciones silvestres de *Agave maximiliana* del occidente de México: Implicaciones para su conservación. *Front. Plant Sci*. 11:817. DOI: 10.3389/fpls.2020.00817
- Cervera H., J. C., Leirana-Alcocer, J. L. y Navarro A., J. A. (2018). Factores ambientales relacionados con la cobertura de *Agave angustifolia* (Asparagaceae) en el matorral costero de Yucatán, México. *Acta botánica mexicana*, (124) <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1252>
- Cetzal-Ix, W. (2018). Sistemas agroforestales y biodiversidad. *Agro Productividad*, 9(9). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/818>

- Cushman, J. C., Davis, S. C., Yang, X. & Borland, A. M. (2015). Development and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands, *Journal of Experimental Botany*, 66(14), 4177–4193, <https://doi.org/10.1093/jxb/erv087>
- Da Oliveira, S. P., Cândido M., J. D., Weber, O. B., Xavier F., A. S., Escobar M., E. O. & De Oliveira, T. S. (2016). Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil. *CATENA*, 137, 508-516. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.017>
- De la Rosa F., L. y Fajardo V., J. (2016). La agrobiodiversidad como elemento de la seguridad alimentaria y ambiental. *Arbor*, 192(779), a316. <https://doi.org/10.3989/arbor.2016.779n3006>
- Delgado V., I. A., Ballesteros P., W. y Arellano, V. (2022). Agrobiodiversidad de leñosas multipropósito en sistemas productivos cafeteros. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 13(2), 67-80. <https://doi.org/10.22490/21456453.4741>
- Díaz, M., Yepez, L., y Gotopo, E. (2018). Agave cocui: un noble de las zonas áridas de Venezuela. Desde el Herbario CICY, 10, 137–143. [http://www.cicy.mx/sitios/desde\\_herbario/2018](http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/2018)
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gravina H., B. A. y Leyva G., Á. (2012). Uso de nuevos índices para evaluar la sostenibilidad de los agroecosistemas en la República Bolivariana de Venezuela. *Cultivos Tropicales*, 33 (3), 15-22. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362012000300002&lng=es&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362012000300002&lng=es&tlng=en).
- Hernández, S. y Gutiérrez, M. (2017). Manejo de sistemas agrosilvopastoriles. *The University of Edinburgh*, 44.
- Honorato-Salazar, J. A., Aburto, J., & Amezcua-Allieri, M. A. (2021). Agave and Opuntia Species as Sustainable Feedstocks for Bioenergy and Byproducts. *Sustainability*, 13(21), 12263. <https://doi.org/10.3390/su132112263>
- Iermanó, M. J. y Sarandon, S. J. (2016). Rol de la agrobiodiversidad en sistemas familiares mixtos de agricultura y ganadería pastoril en la región pampeana argentina: su importancia para la sustentabilidad de los agroecosistemas. Asociación Brasileña de Agroecología; *Revista Brasileira de Agroecología*. 11 (2) 94-103. <http://hdl.handle.net/11336/39527>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal. San Miguel de Allende, Guanajuato. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/11/11003.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11003.pdf)
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP Ecuador) y Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). La biodiversidad para la agricultura y la alimentación en Ecuador; estado actual y proyecciones de su uso sustentable y conservación (*Resumen del informe*) Quito, Ecuador FAO. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4772>.

- Karlen D., L. & Rice, C. W. (2015). Soil Degradation: ¿Will Humankind Ever Learn? *Sustainability* 7(9), 12490-12501. <https://doi.org/10.3390/su70912490>
- Klich, M. G. (Comp.) (2017). Bases agropecuarias. Viedma: Editorial UNRN.
- Kobus-Cisowska, J., Dziedziński, M., Szymanowska, D., Szczepaniak, O., Byczkiewicz, S., Telichowska, A. & Szulc, P. (2020). The Effects of *Morus alba* L. Fortification on the Quality, Functional Properties and Sensory Attributes of Bread Stored under Refrigerated Conditions. *Sustainability*, 12(16), 6691. <https://doi.org/10.3390/su12166691>
- Leyva G., Á. y Lores P., A. (2012). Nuevos índices para evaluar la agrobiodiversidad. *Agroecología*, 7(1), 109–115. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/171061>
- Matran, I. M., Tarcea, M., Rus, D. C., Voda, R., Muntean, D. L. & Cirnatu, D. (2023). Research and Development of a New Sustainable Functional Food under the Scope of Nutrivigilance. *Sustainability*, 15(9), 7634. <https://doi.org/10.3390/su15097634>
- Mazo, N. D., Eliecer R., J. y Castro, A. (2016). Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los sig. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 25 (1), 65-77
- Milheiras, S. G., Sallu, S. M., Loveridge, R., Nnyiti, P., Mwanga, L., Baraka, E., Lala, M., Moore, E., Shirima, D. D., Kioko, E. N., Marshall, A. R. & Pfeifer, M. (2022). Agroecological practices increase farmers' well-being in an agricultural growth corridor in Tanzania. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 56. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00789-1>
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García O., F., García S., R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia T., Y., Troyo, E., y Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34 (1), 39-59.
- Naeem, S., Chazdon, R., Duffy, J. E., Prager, C. & Worm B. (2016). Biodiversity and human well-being: an essential link for sustainable development. *Proc. R. Soc. B*.28320162091. <http://doi.org/10.1098/rspb.2016.2091>
- Niechayev, N. A., Jones, A. M., Rosenthal, D. M. & Davis, S. C. (2019). A model of environmental limitations on production of *Agave americana* L. grown as a biofuel crop in semi-arid regions, *Journal of Experimental Botany*, 70. 122. 6549–6559, <https://doi.org/10.1093/jxb/ery383>
- Nkomoki, W., Tweneboah, H., Donkor, E., Polesny, Z., Ratering, T., Van Damme, P. & Verner, V. (2025). Can homegarden commercialization contribute to food security in Sahel? Case study from northern Ghana. *Agroforest Syst* 99 (62). <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01161-4>
- Ozturk, M., Altay, V., Gönenç, T. M., Unal, B. T., Efe, R., Akçiçek, E., & Bukhari, A. (2021). An Overview of Olive Cultivation in Turkey: Botanical Features, Eco-Physiology and Phytochemical Aspects. *Agronomy*, 11(2), 295. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020295>
- Quiñónez M., M., Enríquez A., I. D., Flores M., J. P., Palacios R., K. Y., Olivas S., M. P., Garza O., F., Lebgue K., T. y Nájera M., J. A. (2018). Comunidades vegetales en suelo de ecosistema semiárido y su relación con hongos

- micorrícicos. *Terra Latinoamericana* 36. 381-391. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.401>
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Roger, E. (2022). Las plantas útiles en los sistemas silvopastoriles tradicionales del noreste de Santiago del estero, Argentina. *Etnobiología*. 20 (2). 252-269. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/501/448>
- Sánchez, I., Funes, F. y Cevallos, A. (2018). Aplicación del índice de agrobiodiversidad en el Ecuador. *Sathiti: sembrador*, 13(1), 247-256. <https://doi.org/10.32645/13906925.527>
- Sharma, R., Mina, U. & Kumar, B. M. (2022). Homegarden agroforestry systems in achievement of sustainable development goals. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 42, (44). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00781-9>
- Silva-Olaya, A. M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K. L., Cherubin, M. R., Duran-Bautista, E. H. y Ortiz-Moreno, F. A. (2022). Silvopastoral systems enhance soil health in the amazon region. *Sustainability*, 14(1), 320. <https://doi.org/10.3390/su14010320>
- Tamayo O., C. V., y Alegre O., J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1) e3287. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J. & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 302. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Villanueva G., C., Lojka, B. y Cardona, C. (2023). Agroforestería para la conservación de la biodiversidad en América Latina: una revisión sistemática. 1. 1-25.
- Villaseñor, J. L., Ortiz, E., Ramírez-Barrios, R. y Murguía-Romero, M. (2023). Riqueza y endemismo de la flora vascular de Guanajuato, México. *Revista mexicana de biodiversidad*. (94). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.5282>
- Wolz, K. J., Lovell, S. T., Branham, B. E., Eddy, W. C., Keeley, K., Revord, R. S., Wander, M. M., Yang, W. H. & De Lucia, E. H. (2017). Frontiers in alley cropping: transformative solutions for temperate agriculture. *Global Change Biology*, 24(3), 883-894. <https://doi.org/10.1111/gcb.13986>

## 5. DEGRADACIÓN DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DEL SEMIÁRIDO: ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS<sup>5</sup>

### 5.1. Resumen

Los sistemas agroforestales se han implementado en el semiárido como alternativa para mitigar el deterioro ambiental, como en el caso del rancho agroecológico de Vía Orgánica en el semiárido guanajuatense, donde se desarrolló la investigación, con el propósito de evaluar la degradación física y química en cuatro condiciones: un sistema silvopastoril (SSP), uno agrosilvopastoril (ASP), un relicto de vegetación nativa (RVN) y un sitio con vegetación alterada (VNA). Para la degradación física se evaluó la densidad aparente (DAP) y se calculó el índice de estabilidad estructural de Pieri (IEE) y para la degradación química; la materia orgánica (MO), pH y conductividad eléctrica (CE), además se realizó una comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ). Como resultado, la degradación física se expresó a nivel de compactación, con valores de 1.63, 1.62, 1.52, 1.39 g cm<sup>-3</sup> en el ASP, SSP, VNA y RVN respectivamente para suelos de texturas mayormente arcillosas, mientras que las cuatro condiciones de estudio presentaron suelos estructuralmente estables con un IEE de 40.59, 16.26, 13.75 y 10.42 para el RVN, VNA, SSP y ASP respectivamente. Con respecto a la degradación química, aparentemente no se ha presentado: el contenido de MO osciló de 6.72 a 20.32%, siendo el ASP con la menor cantidad y el RVN el de mayor cantidad. El pH fluctuó ligeramente de ácido a neutro, la CE más alta fue en el relicto con 0.091 mS m<sup>-1</sup>. La comparación múltiple de medias de Tukey mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre el RVN con respecto al SSP, ASP y VNA para ambas degradaciones, lo que significa que, con las intervenciones, el sistema pierde estabilidad, sobre todo en ambientes semiáridos, donde se requieren más de 10 años para vislumbrar los efectos que se puedan generar sobre el suelo.

**Palabras clave:** Agroforestería, Compactación, Aridoamérica, Materia orgánica

---

<sup>5</sup> Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Autor: Francisco de Jesús Reyes Sánchez

Supervisora de tesis: Rosa María García Núñez

# SOIL DEGRADATION IN SEMI-ARID AGROFORESTRY SYSTEMS: ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL DIMENSIONS<sup>6</sup>

## Abstract

Agroforestry systems have been implemented in semi-arid regions as an alternative to mitigate environmental degradation, as exemplified by the agroecological ranch of Via Organica in the semi-arid region of Guanajuato where this research was conducted. The objective was to evaluate physical and chemical soil degradation under four conditions: a silvopastoral system (SSP), an agrosilvopastoral system (ASP), a relic of native vegetation (RVN), and a site with altered vegetation (VNA). Physical degradation was assessed by evaluating bulk density (BD), and calculate the Pieri structural stability index (SSI), while chemical degradation was analyzed through organic matter content (OM), pH, and electrical conductivity (EC). A Tukey's multiple comparison test ( $\alpha = 0.05$ ) was also performed. The results showed that physical degradation manifested as soil compaction, with bulk density values of 1.63, 1.62, 1.52, and 1.39 g cm<sup>-3</sup> in the ASP, SSP, VNA, and RVN, respectively, in soils with predominantly clayey textures. All four conditions exhibited structurally stable soils, with SSI values of 40.59, 16.26, 13.75, and 10.42 for the RVN, VNA, SSP, and ASP, respectively. Regarding chemical degradation, no apparent degradation was detected: OM content ranged from 6.72% to 20.32%, with the ASP showing the lowest values and the RVN the highest. The pH ranged slightly from acidic to neutral, and the EC was recorded in the RVN, with 0.091 mS m<sup>-1</sup>. Tukey's multiple comparison test revealed statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ ) between the RVN and SSP, ASP, and VNA in terms of both physical and chemical degradation. This suggests that, following intervention, system stability declines especially in semi-arid environments, where more than 10 years may be required to observe the long-term effects of such changes on the soil.

**Keywords:** Agroforestry, Compaction, Aridoamerica, Organic matter

---

<sup>6</sup> Thesis. Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México.  
Author: Francisco de Jesús Reyes Sánchez  
Advisor: Rosa María García Núñez

## 5.2 Introducción

Las zonas áridas y semiáridas de México presentan grandes afectaciones en la calidad del suelo y la diversidad, biológica y cultural que estas albergan (Villanueva, Lojka y Cardona, 2023); presentan, fragilidad y vulnerabilidad ante las intervenciones del hombre (Boza, Robles y González, 2014). Aunado a las altas temperaturas y escasas lluvias, intensifican los procesos de degradación y contribuyen a la fragmentación de los ecosistemas y agroecosistemas (Bhattacharyya, et al., 2015; Karlen y Rice, 2015). Por lo que, los suelos degradados de los paisajes áridos y semiáridos poseen una baja calidad, es decir, se restringe su capacidad para ofrecer bienes y servicios ambientales por las alteraciones que se manifiestan de forma física, química, biológica, ecológica (Lal, 2015) y social.

La reducción de la capacidad y potencial del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos constituye la degradación del suelo que llega incluso a la pérdida de las características físicas química y biológicas (Wang, Zhen, et al., 2023). Los efectos más comunes de la degradación física incluyen la compactación y la formación de costras del suelo. Por otro lado, la presencia de compuestos químicos del suelo altera tanto la composición como las funciones del mismo lo que provoca la degradación química. Estos eventos provocan la pérdida de nutrientes, la salinización y la contaminación química del suelo (Castro-Carreño, Delgado-Londoño y Gonzales-Forero, 2022). Este conjunto de procesos tiene lugar en la superficie del suelo o en capas subsuperficiales (Piscitelli, 2015), muchas veces se perciben como procesos naturales, sin embargo, son acelerados por el uso y manejo inadecuado (Reyes, 2014).

El uso sin una planificación y gestión adecuada de las tierras agrícolas y bosques secos favorece el desgaste del suelo y la disminución de la biodiversidad en estos entornos (Coelho y Marcos, 2020). Lo anterior desencadena una problemática en más de la mitad de estos agroecosistemas, por lo que, la intervención debe asegurar la conservación de los recursos y generar beneficios ecológicos, sociales y económicos (Haro-Martínez y Taddei-Bringas, 2014).

Los sistemas agroforestales del semiárido como prácticas ancestrales fortalecen el arraigamiento a la tierra y el control de la degradación del suelo (Espinoza et al., 2020); en la medida en que la diversidad vegetal aumenta con los sistemas agroforestales, se promueven y mejoran los servicios ambientales que contribuyen al bienestar social (Leahy, Kearney, Reisinger y Clark, 2019) y a la conservación de la diversidad cultural a lo largo de la historia aridoamericana, se han establecido como estrategias para un abastecimiento constante de alimentos que han contribuido al bienestar de los pueblos nativos (Mazo, Eliecer y Castro, 2016). Estos sistemas utilizan diversas especies endémicas, que ayudan a conservar la diversidad y propiedades del suelo (Tamayo y Alegre, 2022). Así mismo, integran árboles, arbustos, herbáceas y animales de usos múltiples que permiten diversificar los productos obtenidos de manera efectiva para el aprovechamiento sostenible (Boza, et al., 2014; Holanda, Pereira y Ferelli, 2017).

Por lo tanto, el propósito de esta investigación fue evaluar la degradación física y química del suelo a través de la determinación de la estabilidad estructural, compactación, contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica en cuatro sistemas: agrosilvopastoril, silvopastoril, relicto de bosque seco y un área de vegetación alterada.

### **5.3 Materiales y métodos**

#### **5.3.1 Descripción geográfica del área de estudio**

El estudio se realizó en el rancho agroecológico de Vía Regenerativa y Orgánica de México A. C., localizada al sur del municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, entre las coordenadas geográficas 20° 48' 51" y 20° 49' 14" de latitud Norte y entre 100° 37' 15" y 100° 37' 39" de longitud Oeste (INEGI, 2010), con altitudes de 2,133 a 2,177 m (Figura 5).

El clima es BS<sub>1</sub>kw, clasificado como semiseco templado con un verano cálido (García, 2004), que presenta temperaturas medias de 12 a 18 °C y una precipitación menor a 650 mm anuales, la vegetación original es selva baja

caducifolia (Rzedowski, 2006) predominando los géneros de *Acacia*, *Bursera*, *Caesalpinia*, *Pithecellobium*, *Neltuma*, *Lysiloma*, *Mimosa* y muchos más (García, Valle y Monroy, 2021; Zepeda, Burrola, White y Rodríguez, 2017). La geología predominante son rocas sedimentarias, conglomerados y areniscas, los suelos presentes en la región son del grupo vertisol (INEGI, 2010).

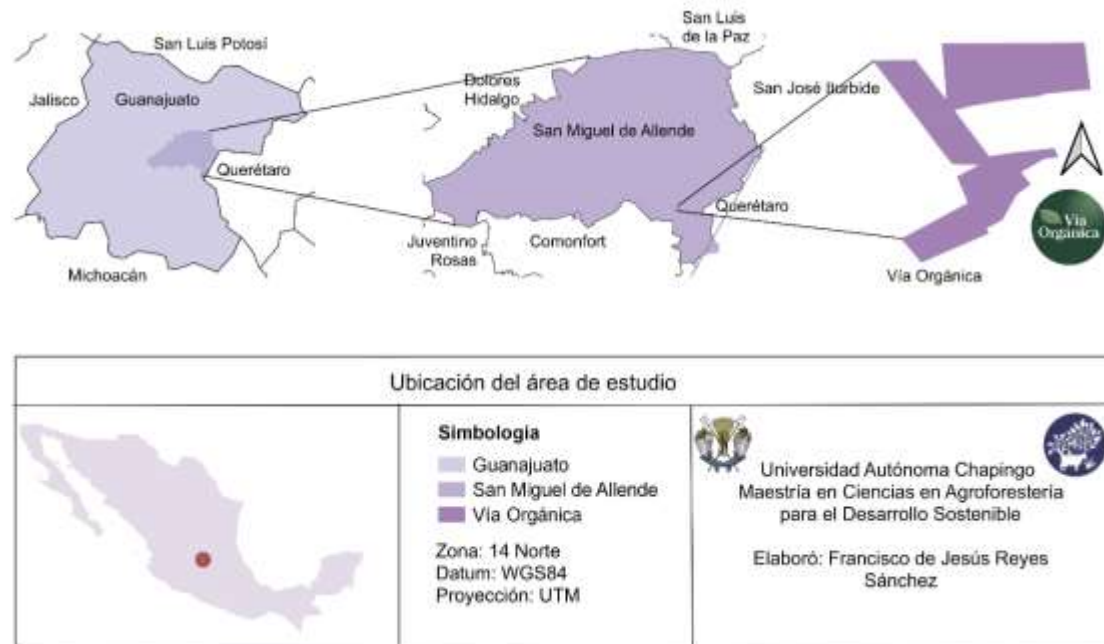


Figura 5. Ubicación del área de estudio.

### 5.3.2 Sistemas evaluados

Los sistemas evaluados fueron 4; un relicto de vegetación nativa (RVN), un relicto de vegetación alterada (VNA) y dos sistemas agroforestales: un silvopastoril (SSP) y un agrosilvopastoril (ASP) (Figura 6).

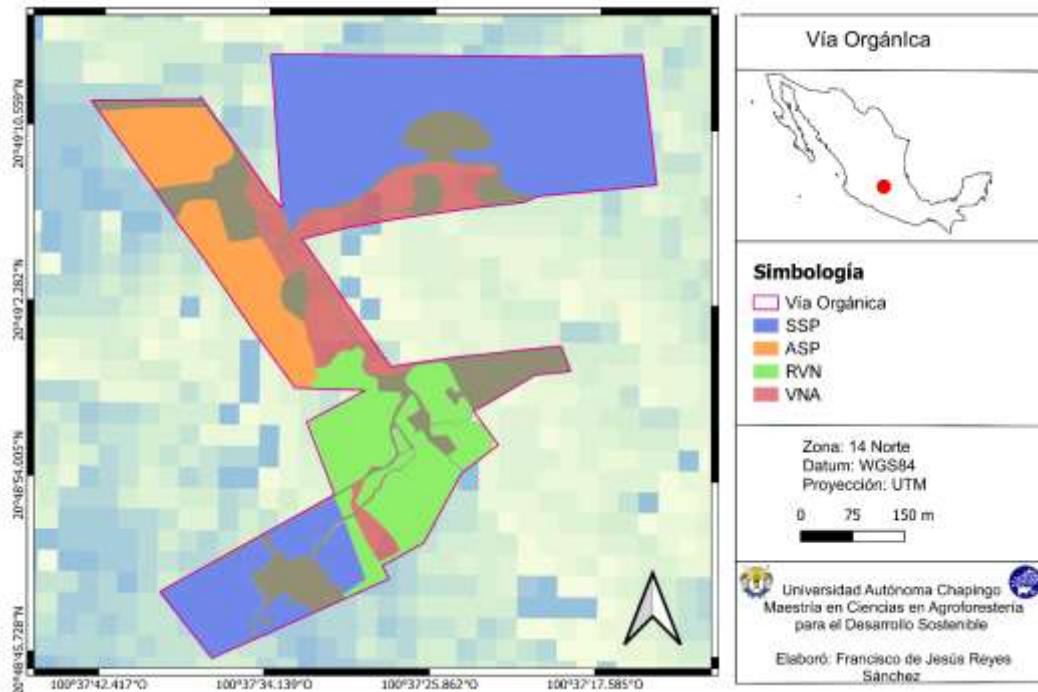


Figura 6. Distribución de los sistemas de estudio.

El relicto de vegetación nativa (RVN) es un fragmento de la vegetación original nativa correspondiente a la selva baja caducifolia con una extensión de 4.7 ha ubicado a 2,177 msnm, con árboles de los géneros, *Neltuma*, *Acacia*, *Eysenhardtia*, *Condalia*, entre otros, suculentas de los géneros, *Myrtillocactus*, *Opuntia*, *Agave*, *Carnegiea*, y más, herbáceas de los géneros, *Aristida*, *Ageratina*, *Perymenium*, *Euphorbia*, entre otros, así como animales de los géneros, *Masticophis*, *Lepus*, *Peromyscus*, entre otros (Figura 7). Los beneficios que ofrece este sitio están enfocados a la conservación de los recursos naturales y la preservación de los servicios ecosistémicos.



Figura 7. Relicto de bosque seco del semiárido guanajuatense en época lluviosa.

El sitio de vegetación alterada (VNA) tiene una extensión de 3.2 ha es herbazal inducido por la intervención humana donde quedaron algunos nopales, agaves y herbáceas de los géneros, *Aristida*, *Ageratina*, *Perymenium*, *Desmodium*, *Euphorbia* y pastos de los géneros *Bouteloua*, *Cenchrus*, *Chloris*, *Eragrostis*, entre otros (Figura 8). Los beneficios que este sistema ofrece se enfocan en los servicios ecosistémicos.



Figura 8. Sitio de vegetación alterada del rancho agroecológico

El sistema silvopastoril (SSP) trashumante tiene una extensión de 13 ha que aprovecha las herbáceas anuales, con una gran diversidad de géneros resaltando *Ipomea*, *Proboscidea*, *Desmanthus*, *Sanvitalia*, *Senecio*, *Melinis*, *Paspalum*, *Panicum*, *Eleusine* y muchos más. Los árboles dominantes son del género *Neltuma* y las suculentas son agaves y algunos nopales. Los animales que ahí pastorean son gallinas, ovejas, cabras y algunos caballos y burros (Figura 9). Los principales beneficios que se obtienen del sistema son alimento para el ganado y la protección al suelo.



Figura 9. Sistema silvopastoril establecido en Vía Orgánica.

El sistema agrosilvopastoril (ASP) tiene una extensión de 3.5 ha y fue establecido con suculentas de los géneros *Opuntia* y *Agave*; así como árboles frutales como, mora, olivo, granada y mezquite; cultivos como maíz intercalado con girasol y calabaza o maíz con cosmos y en invierno se siembra garbanzo. En el sistema pastorean gallinas, guajolotes, patos, cabras y ovejas (Figura 10). Los beneficios están enfocados en el consumo humano, consumo animal y algunos a los servicios ecosistémicos.



Figura 10. Sistema agrosilvopastoril establecido en Vía Orgánica.

### **5.3.3 Determinación de la degradación física del suelo**

La degradación física del suelo se evaluó considerando la estabilidad estructural con el método de Pieri (1995) para el cual se determinó la materia orgánica (Walkley y Black, 1934) y textura (Bouyoucos, 1962); y la compactación con la densidad aparente determinada por el método del terrón parafinado, con base en la NOM-021-RECNAT-2000. La interpretación se realizó con base en Fernández, (2014) y Kawy y Darwish (2019).

### **Muestreo de suelos**

El muestreo del suelo se realizó de manera sistemática a una profundidad de 0 – 20 cm, se digitalizó la superficie con el programa Qgis® 3.28 y se ubicaron los sitios de muestreo en una cuadrícula de 50 x 50 m, posteriormente se rectificaron en campo con un GPS modelo Garmin®.

El número de repeticiones en cada unidad estuvo en función de la superficie de cada sistema; se colectaron 46, 14, 13 y 10 repeticiones en el SSP, RVN, ASP y VNA respectivamente para obtener un 85 % de confiabilidad en los resultados (Figura 11).

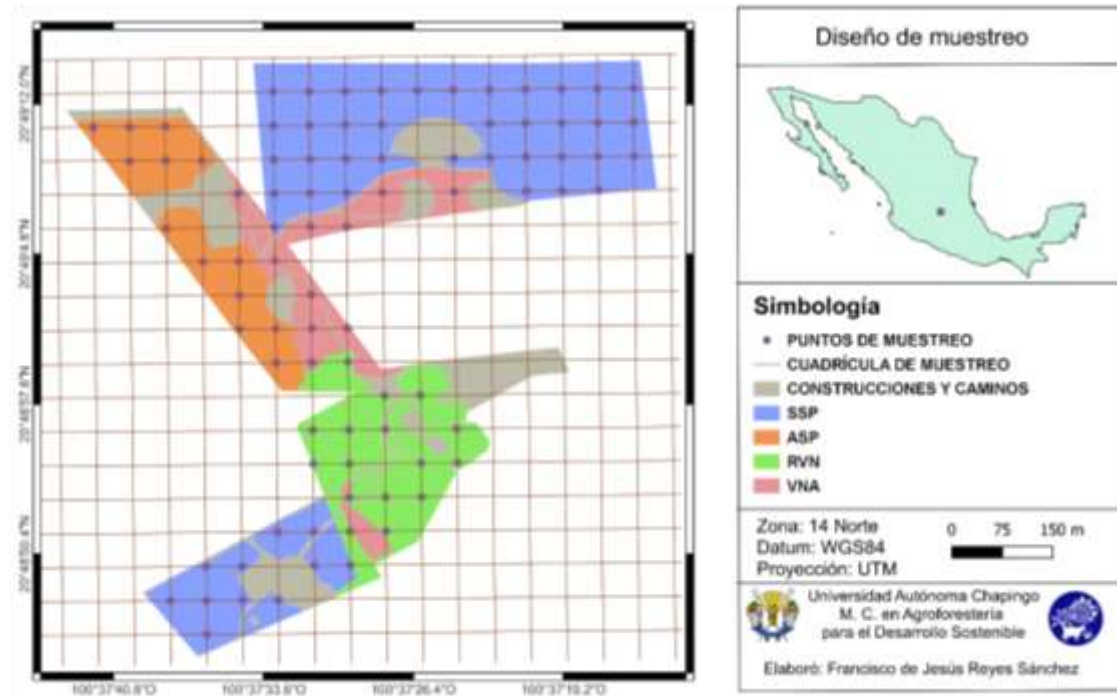


Figura 11. Distribución de los puntos de muestreo en el rancho agroecológico

### Estabilidad estructural

La determinación de la estabilidad estructural del suelo se llevó a cabo utilizando los porcentajes de materia orgánica, limo y arcilla como se indica en la Ecuación (9) (Pieri, 1995); los resultados se interpretaron con base en el potencial de degradación presente en el Cuadro 11. Las partículas minerales también se utilizaron para determinar la conductividad hidráulica del suelo (Calderón y Pavlova, 1999).

$$IEE = \frac{\% MO}{\% L + \% A} * 100 \quad (9)$$

Donde:

IEE = Índice estructural

% MO = Porcentaje de materia orgánica

% L = Porcentaje de limo

% A = Porcentaje de arcilla

Cuadro 11. Potencial de degradación respecto a los valores del índice estructural de Pieri.

| Valor | Clasificación                               |
|-------|---------------------------------------------|
| < 5   | Suelos degradados                           |
| 5 – 7 | Suelos con alto riesgo a la degradación     |
| 7 – 9 | Suelos con riesgo moderado a la degradación |
| > 9   | Suelos estructuralmente estables            |

Fuente: Fernández (2014).

### Compactación del suelo

La compactación se determinó con base en la comparación de densidades por el método del terrón parafinado demostrado en la Ecuación (10) y se interpretó con base en lo propuesto por Kawy y Darwish (2019), como se muestra en el Cuadro 12.

$$DAP = \frac{(Pt)a}{V_t} \quad (10)$$

Donde:

DAP = Densidad aparente del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ )

(Pt)a = Peso del terrón al aire (g)

Vt = Volumen del terrón ( $\text{cm}^3$ )

Cuadro 12. Clasificación de la degradación del suelo con respecto a la densidad aparente de acuerdo con la clase textural predominante en el suelo.

| Suelo     | Valor ( $\text{g cm}^{-3}$ ) | Clasificación            |
|-----------|------------------------------|--------------------------|
| Arcilloso | 1.0 – 1.19                   | Sin degradación aparente |
|           | 1.2 – 1.39                   | Degradación ligera       |
|           | 1.40 – 1.60                  | Degradación moderada     |
|           | > 1.60                       | Degradación alta         |
| Franco    | 1.20 – 1.32                  | Sin degradación aparente |

|             |                      |
|-------------|----------------------|
| 1.33 – 1.45 | Degradación ligera   |
| 1.46 – 1.66 | Degradación moderada |
| > 1.66      | Degradación alta     |

Fuente: Kawy y Darwish (2019)

#### 5.3.4 Determinación de la degradación química del suelo

La degradación química se evaluó e interpretó a través del contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica y pH con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

##### Materia orgánica

La materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (1934) y se interpretó con base en lo reportado por Molina (2018) en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Nivel de degradación con respecto al contenido de materia orgánica en el suelo.

| Valor (%) | Clasificación | Degradación en función de la materia orgánica           |
|-----------|---------------|---------------------------------------------------------|
| < 2       | Bajo          | Degradado                                               |
| 2 – 5     | Medio         | Moderadamente susceptible a la degradación              |
| 5 – 10    | Optimo        | Suelo estable, ligeramente susceptible a la degradación |
| > 10      | Alto          | Suelo estable, sin degradación aparente                 |

Fuente: Molina (2018).

##### Potencial de Hidrogeno del suelo

El pH se midió en el extracto de la pasta de saturación del suelo con un medidor de pH, la clasificación de estos valores y los elementos químicos que pueden presentarse se enmarcan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Clasificación de los valores de pH y elementos químicos potencialmente tóxicos en el suelo.

| Valor     | Clasificación          | Elementos tóxicos          |
|-----------|------------------------|----------------------------|
| < 5       | Fuertemente ácido      | Al <sup>3+</sup>           |
| 5.1 – 6.5 | Moderadamente ácido    | Fe, Cd, Mn, Co, Zn, Cu, As |
| 6.6 – 7.3 | Neutro                 | Sin toxicidad aparente     |
| 7.4 – 8.5 | Moderadamente alcalino | Ca, Na, B, Mg, Mo, K, P, S |
| > 8.5     | Fuertemente alcalino   |                            |

Fuente: Martínez-Alva, et al., (2020); NOM-021-RECNAT-2000

### Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica se midió en el extracto de la pasta de saturación del suelo con un conductímetro, la clasificación de los valores de conductividad y el nivel de degradación interpretado por Kawy y Darwish (2019) como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Interpretación de los valores de la conductividad eléctrica y el nivel de degradación que presentan en el sistema.

| Valor (dS m <sup>-1</sup> ) | Clasificación         | Nivel de degradación     |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <1                          | Libre de sales        | Sin degradación aparente |
| 1 – 2                       | Muy bajo en sales     | Sin degradación aparente |
| 2.1 – 4                     | Moderadamente salino  | Degradación baja         |
| 4.1 – 8                     | Salino                | Degradación moderada     |
| 8.1 – 16                    | Fuertemente salino    | Degradación alta         |
| >16                         | Extremadamente salino | Degradación intensa      |

Fuente: Kawy y Darwish (2019); NOM-021-RECNAT-2000

### 5.3.5 Análisis estadístico de la degradación del suelo

El análisis se llevó a cabo con un análisis de varianza con datos desbalanceados por tener diferentes números de muestras por sistema de estudio, además se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) y un análisis de conglomerados para identificar la similitud de los datos (Infante y Zarate, 1990; Ruiz, 2019).

## 5.4 Resultados y discusión

### 5.4.1 Degradación física del suelo

La comparación múltiple de medias de Tukey de la degradación física revela que hay diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en las propiedades evaluadas y se dividieron en dos grandes grupos; la condición natural y las intervenidas, siendo estas últimas las de los valores más severos (Cuadro 16).

Cuadro 16. Comparación múltiple de medias de la degradación física del suelo

| Sistema                      | DAP <sup>z</sup> (g cm <sup>-3</sup> ) |    | IEE <sup>y</sup>  |   |
|------------------------------|----------------------------------------|----|-------------------|---|
|                              | Media $\pm$ DE <sup>x</sup>            |    | Media $\pm$ DE    |   |
| Relicto de vegetación nativa | 1.39 $\pm$ 0.28                        | a  | 40.59 $\pm$ 19.41 | a |
| Vegetación natural alterada  | 1.52 $\pm$ 0.12                        | ab | 16.26 $\pm$ 5.46  | b |
| Sistema silvopastoril        | 1.62 $\pm$ 0.14                        | b  | 13.75 $\pm$ 6.76  | b |
| Sistema agrosilvopastoril    | 1.63 $\pm$ 0.07                        | b  | 10.42 $\pm$ 3.28  | b |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>z</sup>DAP: Densidad aparente, <sup>y</sup>IEE: Índice de estabilidad estructural, <sup>x</sup>DE: Desviación estándar.

El relicto fue el sistema mejor evaluado debido a la conservación de sus propiedades por la preservación de sus condiciones naturales, sin embargo, a medida que el sistema es intervenido se propicia la degradación. La estabilidad estructural del suelo esta influenciada por el contenido de materia orgánica (MO) y la textura, por lo que se utiliza como un indicador de la degradación del suelo (Ojeda, et al., 2018). Los porcentajes de arcilla, limo y MO se utilizaron para determinar la estabilidad estructural del suelo que se presentan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Índice de estabilidad estructural del suelo mediante la composición granulométrica y contenido de materia orgánica del suelo

| Sistema          | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | MO <sup>v</sup> (%) | IEE <sup>u</sup> |
|------------------|-----------|----------|-------------|---------------------|------------------|
| ASP <sup>z</sup> | 34.44     | 19.78    | 45.78       | 6.72                | 10.42            |
| SSP <sup>y</sup> | 34.39     | 21.66    | 43.96       | 8.69                | 13.75            |
| VNA <sup>x</sup> | 40.46     | 21.82    | 37.72       | 9.57                | 16.26            |
| RVN <sup>w</sup> | 48.36     | 19.75    | 31.90       | 20.32               | 40.59            |

<sup>z</sup>ASP: Agrosilvopastoril, <sup>y</sup>SSP: Silvopastoril, <sup>x</sup>VNA: Vegetación natural alterada, <sup>w</sup>RVN: Relicto de vegetación nativa, <sup>v</sup>MO: Materia orgánica, <sup>u</sup>IEE: Índice de estabilidad estructural

De acuerdo con los valores reportados en el Cuadro 17, los valores del índice de estabilidad estructural mostraron una tendencia decreciente, al igual que el contenido de materia orgánica, en función del grado de intervención del sistema evaluado. El relicto presentó las condiciones más favorables, seguido por el área con vegetación alterada, continuando con el sistema silvopastoril y, por último, el agrosilvopastoril, el cual registró los valores más bajos, próximos al límite de susceptibilidad a la degradación.

Circunstancias similares reportaron Contreras-Santos, et al., (2023) quienes encontraron que el índice de estabilidad de un bosque seco fue mayor en un 50 % que el del sistema agrisilvícola asociado a la diversidad vegetal y a los efectos de manejo en el sistema. Los relictos de bosques secos caducifolios del semiárido debido a su estado natural, aportan constantemente materia orgánica de diversas fuentes vegetales, esto favorece al ecosistema y proporciona el material floculante necesario para mantener al suelo de estos sitios, estable (Zuluaga-Zuluaga y Castro-Escobar, 2018). El área de vegetación alterada se encuentra desprovista de árboles, las plantas dominantes son anuales con agaves y escasos arbustos, sin embargo, a pesar de su condición, presentó un mejor valor de estabilidad que los sistemas agroforestales donde las especies están controladas, lo que coincide con lo que hallaron Chávez, et al., (2024) que indican que, a mayor biodiversidad, las condiciones del sistema se ven favorecidas.

En los sistemas agroforestales, factores como la edad de las plantas y las prácticas de manejo implementadas limitan el aporte de materia orgánica al suelo, como ocurre en los relictos. Aunado a eso, ello se suma que una proporción significativa del material vegetal producido es consumida por el ganado o removida para su procesamiento y posterior uso como forraje, restringiendo así su reincorporación natural al suelo. Esta interrupción en el ciclo de la materia orgánica afecta negativamente la dinámica edáfica, particularmente el índice de estabilidad estructural.

En consecuencia, a medida que el sistema es intervenido y se ve comprometida la diversidad biológica, se observa una disminución progresiva en la estabilidad del suelo en comparación con sistemas que conservan condiciones naturales (Figura 12) (Fahad, et al., 2022; Madrigal, Cristóbal, Hernández, Romo, 2019).

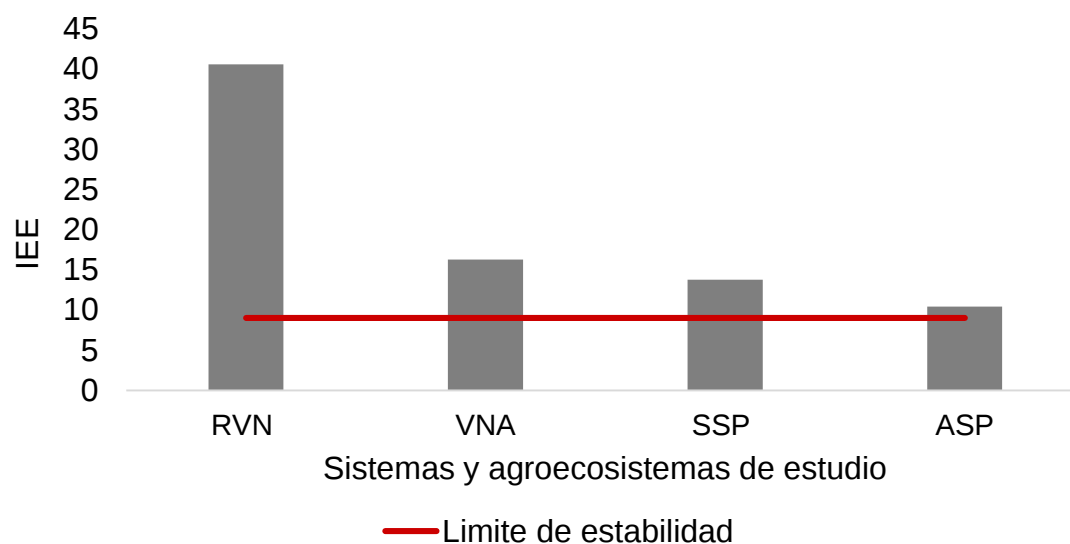


Figura 12. Índice de estabilidad estructural del suelo de las condiciones de estudio comparado con el límite de estabilidad.

Las clases texturales presentes en las condiciones de estudio fueron arcillosas para los sistemas silvopastoril y agrosilvopastoril con un máximo de 45.78 % de arcilla y 21.66 % de limo; franco arcilloso en los sitios de vegetación alterada con 37.72 % de arcilla y 21.82 % de limo; y, franco arcillo arenosa para los relictos con 31.90 % de arcilla y 19.75 % de limo

Debido a su composición y estructura, las fracciones finas forman microagregados que, mediante la acción de agentes floculantes como la materia orgánica, se integran en agregados más estables. Esta organización estructural les confiere una mayor resistencia a las fuerzas externas sin comprometer su integridad interna (Wang, Yang, et al., 2016). Además, favorece la conductividad hidráulica del suelo. Según los datos obtenidos, el sistema con mayor conductividad hidráulica fue el relikto, con un valor de  $2.6 \text{ mm h}^{-1}$ , seguido del área con vegetación alterada con  $2.0 \text{ mm h}^{-1}$ , los sistemas silvopastoril y agrosilvopastoril con  $1.7$  y  $1.6 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente.

La conductividad hidráulica del suelo se refiere a la capacidad del perfil edáfico para permitir el movimiento del agua, proceso fundamental tanto para la disolución y transporte de nutrientes para la absorción por las plantas, como para la recarga de acuíferos en los sistemas hidrológicos (Zhang et al., 2016). Los resultados indican que, conforme disminuye la estabilidad estructural del suelo, también se reduce su conductividad hidráulica, dado que la presencia de capas masivas y poco agregadas dificulta el desplazamiento del agua en comparación con suelos bien estructurados (Zhu, Ali, Bennett, Guppy y McKenzie, 2022). Este proceso cobra particular relevancia en agroecosistemas ubicados en zonas semiáridas, donde la disponibilidad hídrica representa una de las principales limitantes para la productividad y sostenibilidad del sistema.

La compactación del suelo es un proceso de deterioro de los suelos en el cual las partículas minerales se acumulan y reacomodan lo que forma la formación de capas endurecidas, lo cual conlleva a la reducción en la porosidad total del suelo y con ello al incremento de la densidad aparente (Bustamante, Chabla-Carrillo y Barrezueta-Unda, 2018; Rollán y Bachmeier, 2015). De acuerdo con el Cuadro 18, el sistema agrosilvopastoril, el de mayor intervención, presentó una densidad aparente elevada de  $1.63 \text{ g cm}^{-3}$  en contraste el relicto de selva baja caducifolia obtuvo una densidad de  $1.39 \text{ g cm}^{-3}$  que fue identificada como compactación ligera.

Cuadro 18. Nivel de compactación con respecto a la clase textural en función de la densidad aparente del suelo.

| Sistema          | Clase textural         | Densidad aparente<br>( $\text{g cm}^{-3}$ ) | Nivel de compactación |
|------------------|------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| ASP <sup>z</sup> | Arcillosa              | 1.63                                        | Alto                  |
| SSP <sup>y</sup> | Arcillosa              | 1.62                                        | Alto                  |
| VNA <sup>x</sup> | Franco arcillosa       | 1.52                                        | Moderado              |
| RVN <sup>w</sup> | Franco arcillo arenosa | 1.39                                        | Ligero                |

<sup>z</sup>ASP: Agrosilvopastoril, <sup>y</sup>SSP: Silvopastoril, <sup>x</sup>VNA: Vegetación natural alterada, <sup>w</sup>RVN: Relicto de vegetación nativa.

En el semiárido todos los factores que influyen en los sistemas son importantes aun si el efecto es pequeño ya que las condiciones climáticas magnifican los impactos (Alawamy, Balasundram, Mohd y Teh, 2022). La diversidad vegetal de los relictos permite que haya densidades favorables por los múltiples aportes de hojarasca a la superficie y por la densidad radicular considerable del estrato arbóreo en el subsuelo lo que permite que la materia orgánica descompuesta, microorganismos y agua se concentren en el perfil del suelo en los macroporos que dejan las raíces al morir (Kalhor et al., 2017; Nascente, Li y Crusciol, 2015).

En los sistemas agroforestales, la diversidad es baja, las especies tienen un fin productivo principalmente, además, las plantas arbóreas son muy jóvenes, fueron producidas mediante la técnica asexual de acodos aéreos, lo que restringe significativamente el desarrollo del sistema radicular ya que no presentan raíz principal para la ruptura de las capas subsuperficiales del suelo, por lo que sus efectos sobre las condiciones iniciales del terreno está mayormente condicionado a los aportes de materia orgánica, los cuales son controlados por el manejo de los árboles en el sistema. Si bien, en estos sistemas se tienen aportes de estiércol del ganado, los beneficios que pudiese traer el aporte se contrarrestan con el paso constante de los animales que pisan y compactan las capas superficiales, más cuando la cubierta es escasa (Blanco-Sepúlveda, Gómez-Moreno y Lima, 2024; Teferi, Bewket y Simane ,2016) o ha sido consumida.

Con lo anterior y como se observa en la Figura 13, la conservación de las condiciones naturales del ecosistema resulta más favorable que su conversión en sistemas de aprovechamiento productivo. Esta transformación solo sería justificable en sitios previamente degradados, donde la implementación de prácticas de restauración como los sistemas agroforestales pueden contribuir a mitigar los efectos de la degradación y mantener tanto la diversidad vegetal como las propiedades del suelo estables al mismo tiempo que se aprovecha el espacio (Nguyen, et al., 2023).

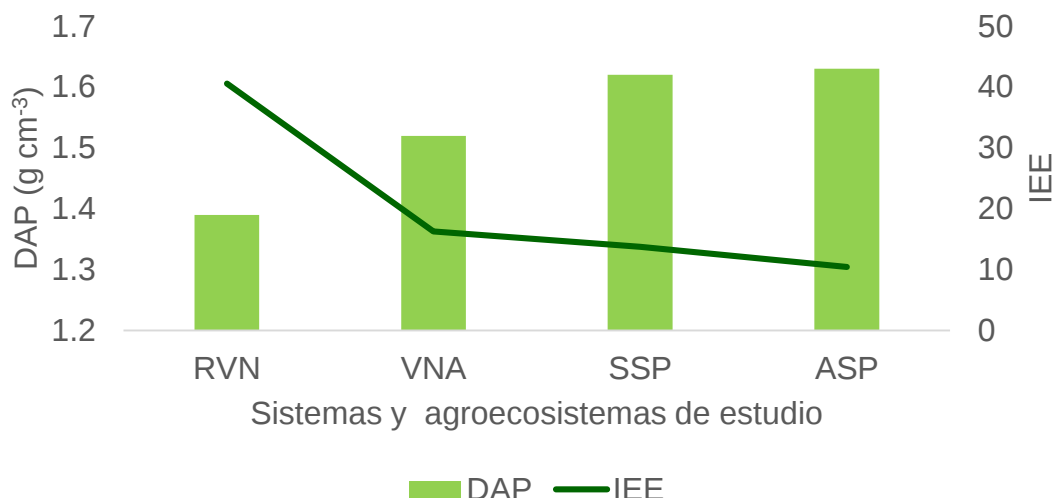


Figura 13. Relación entre el índice de estabilidad estructural y la densidad aparente del suelo de las condiciones de estudio.

#### 5.4.2 Degradación química del suelo

Las propiedades químicas permiten determinar el grado de la degradación química en el suelo. La evaluación de las propiedades químicas del suelo; pH, conductividad eléctrica y materia orgánica evidencian que aparentemente no hay degradación ya que los niveles están en el rango favorable para mantener las condiciones del suelo estables. La comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey demostró que hay diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) en los datos de los sistemas evaluados, al igual que en el análisis de la degradación física, se agruparon en dos categorías; el sistema natural y los que han sufrido alteraciones (Cuadro 19).

Cuadro 19. Análisis de varianza de la degradación química del suelo

| Sistema          | MO <sup>z</sup> (%)     | pH <sup>y</sup> | CE <sup>x</sup> (mS m <sup>-1</sup> ) |
|------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|
|                  | Media ± DE <sup>w</sup> | Media ± DE      | Media ± DE                            |
| RVN <sup>v</sup> | 20.32 ± 9.1 a           | 6.11 ± 0.79 a   | 0.091 ± 0.03 a                        |
| VNA <sup>u</sup> | 9.58 ± 3.13 b           | 6.42 ± 0.48 ab  | 0.033 ± 0.01 b                        |
| SSP <sup>t</sup> | 8.69 ± 3.6 b            | 6.58 ± 0.32 b   | 0.040 ± 0.02 b                        |
| ASP <sup>s</sup> | 6.72 ± 1.95 b           | 6.59 ± 0.28 b   | 0.042 ± 0.01 b                        |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>z</sup>MO: Materia orgánica, <sup>y</sup>pH: Potencial de Hidrógeno, <sup>x</sup>CE: Conductividad eléctrica, <sup>w</sup>DE: Desviación estándar, <sup>v</sup>Relicto de vegetación nativa, <sup>u</sup>VNA: Vegetación natural alterada, <sup>t</sup>SSP: Silvopastoril, <sup>s</sup>ASP: Agrosilvopastoril.

Las intervenciones de los sistemas generan cambios desfavorables en las propiedades, lo que compromete su estabilidad. Los relictos por su estado natural presentan los mejores valores gracias a su condición inalterada.

El contenido de materia orgánica del suelo fue alto, los valores más bajos los presentaron los sistemas agroforestales con 6.72 y 8.69 % en el ASP y SSP respectivamente, a estos sistemas les continúo la VNA con un contenido de 9.57 % mientras que el contenido máximo se obtuvo en el RVN con 20.32 %, por lo que son sistemas con un gran potencial para la alimentación microbológica y el mejoramiento de la porosidad lo que mejora la estructura del suelo y por ende, la conductividad hidráulica del sistema (Aguirre-Forero, Piraneque-Gambasica y Cabarcas-Saumeth, 2022).

El relicto del bosque seco caducifolio ha prevalecido a pesar del cambio de uso de suelo que se ha generado a su alrededor, los árboles que aquí se encuentran son viejos, y desde hace varios años atrás han tenido aportes constantes de hojarasca al sistema, el suelo que a ellos sostiene no ha sufrido cambios más allá de los naturales ya que la cobertura vegetal no ha sido manipulada y por eso las altas concentraciones de materia orgánica (Banegas, Albanesi, Pedraza y Dos Santos, 2015; Lizaga, Quijano, Gaspar y Ramos, 2019). La materia orgánica interviene en la estabilidad de los agregados, flocula limos y arcillas para formar estructuras orgánicas estables que aumentan el espacio poroso y así permiten a las raíces desarrollarse con mayor facilidad, además del flujo de aire y agua lo que mantiene el dinamismo del sistema (Wen, He y Zhang, 2016).

En contraste, en los sistemas agroforestales, la diversidad es controlada y manejada a beneficio social con actividades en pro de la producción. Las plantas no superan los 15 años, producidas de manera asexual lo que permitió tener árboles de más de 1.5 m de altura en un año, sin embargo, no están lo suficientemente desarrollados ni adaptados a las condiciones semiáridas, por lo que sus aportes de hojarasca al sistema son bajos (Chaieb, Abdelly y Michalet, 2019; Chiang, Yu y Lai, 2021), además de eso, una de las limitantes para el

crecimiento de los cultivos establecidos es la sombra, por lo que el manejo de las copas limita tanto los aportes de hojarasca como la protección hacia la superficie.

Mientras en el relicto las herbáceas crecen sin control, aparentemente también ocurre eso en el sistema silvopastoril, sin embargo, en este sistema, el ganado compuesto por ovejas y cabras pastorea y aunque no es mucho tiempo en el mismo espacio, si es el suficiente para que eliminen gran parte de la cobertura herbácea que ahí crecía lo que impide aportes regulares de materia orgánica al suelo y al final de la época lluviosa, la mayor parte del sistema presenta cobertura a ras de suelo (Zhu, Merbold, et al., 2020).

En el sistema agrosilvopastoril, además del ganado que consume la cobertura, se sembraron cultivos anuales como maíz, girasol y calabaza, mientras el cultivo está establecido, se liberan gallinas en él para el control de las malezas, por lo que al final del ciclo, el suelo mantiene poca hojarasca de los árboles y una porción del material producido del cultivo, el resto es extraído para procesarlo y resguardarlo como alimento para el ganado en la época seca (Ma, et al., 2022).

Todas las intervenciones que se realizan al sistema perjudicaron el contenido de materia orgánica, así como las propiedades que están relacionadas a ella, como la estabilidad de agregados, la estructural, conductividad hidráulica, porosidad, entre otras (Hosseini, et al., 2023). Estos resultados remarcan la urgente necesidad de optimizar los sistemas de gestión agrícola para mantener y mejorar el contenido de materia orgánica en los suelos cultivados, lo cual es esencial para la sostenibilidad del terreno (Raiesi, 2017).

Con respecto al pH, Los valores que expresaron las condiciones de estudio revelaron que el más bajo esta en los relictos con 6.11 seguido de la vegetación alterada con 6.42, a estos valores les siguió el silvopastoril con 6.58 y el más alto en el agrosilvopastoril con 6.59, estos valores están entre pH ligeramente ácidos y neutros respectivamente. Los valores más bajos se atribuyen a una mayor liberación de ácidos húmicos por la descomposición de la materia orgánica (Yakupoglu, Saltali, Rodrigo-Comino, Yakupoglu, Cerda, 2022).

Los sistemas de estudio, con una condición de pH óptimo ofrece estabilidad a la solución del suelo, sin embargo, en condiciones semiáridas se presentan fluctuaciones en la humedad del suelo por las bajas precipitaciones, lo que impide la disponibilidad de los nutrientes y limita la solubilización de compuestos químicos potencialmente tóxicos que afectan la integridad del suelo (Wang, Qi, et al., 2023; Waheed, et al., 2022). Las altas concentraciones de materia orgánica favorecen el almacenamiento de agua capilar en el suelo, la cual concentra y transporta las sustancias químicas que resultan de la descomposición de la materia orgánica las cuales disminuyen el pH (Benslama, et al., 2020; Chávez et al., 2024; Dong, et al., 2024).

Finalmente, la presencia de sales en los suelos de los sistemas de estudio fue baja, el sistema con el valor más alto de conductividad eléctrica fue el relicto con  $0.091 \text{ mS m}^{-1}$ , seguido del agrosilvopastoril con  $0.042 \text{ mS m}^{-1}$  luego el silvopastoril con  $0.040 \text{ mS m}^{-1}$ , finalmente, el del valor mínimo fue la vegetación alterada con  $0.033 \text{ mS m}^{-1}$ . Aún con la concentración más alta, no son valores que generen alteraciones en el funcionamiento del sistema suelo o sus componentes (Benslama, et al., 2020; Ismayilov, Mamedov, Fujimaki, Tsunekawa y Levy, 2021).

En el semiárido, la distribución desigual de la precipitación y la estabilidad de la humedad del suelo son muy cambiantes la mayor parte del año, por lo que cuando disminuye se limita la solubilización y la concentración de sales en la solución del suelo (Deng, 2020). Los estiércoles del ganado, principalmente ovino y caprino son ricos en iones benéficos gracias a la selectividad para alimentarse, cuando se descomponen los liberan a la solución del suelo, lo que la vuelve más concentrada (Saraiva, et al., 2022; Zhu, Merbold, et al., 2020).

#### **5.4.3 Análisis de conglomerados**

El análisis realizado sobre las cuatro condiciones de estudio muestra patrones claros de similitud estructural en función de las variables edáficas asociadas a procesos de degradación del suelo.

El dendrograma resultante (Figura 14) presenta una clara diferenciación en dos grupos principales; en el primero, las tres condiciones intervenidas; ASP, SSP y VNA, los cuales presentan distintos grados de intervención antropológica. ASP y SSP se agrupan en primer lugar, indicando una alta similitud en las propiedades físicas y químicas relacionadas al manejo intensivo del paisaje con prácticas agropecuarias que implican compactación, pérdida de materia orgánica y la disminución de la capacidad de retención de agua. Por otro lado, la VNA, aunque no responde a un sistema productivo como los anteriores, presenta características edáficas alteradas, esto permite inferir que procesos de degradación pasiva como la eliminación selectiva de especies han deteriorado progresivamente la funcionalidad del suelo, lo que la alejó de su estado original y la aproximó a los sistemas agroforestales (Borrelli, et al., 2017)

El segundo grupo solo se compone del relicto, a una distancia considerable del resto, muestra su baja similitud con los otros tipos de condiciones, esto refleja mayor integridad ecológica y funcionalidad edáfica. Los suelos de este sitio conservan mejores condiciones estructurales, mayores contenidos de materia orgánica, menor compactación actuando como referencia de condiciones edáficas óptimas o poco degradadas (Chen, Zhang y Zhang, 2020)

La configuración del dendrograma permite inferir un gradiente de intervención humana que va desde los sistemas más intensamente modificados (ASP y SSP), pasando por vegetación natural alterada (VNA), hasta llegar a ecosistemas relativamente inalterados (RVN). Esta información es valiosa para la planificación del uso del suelo, así como para la evaluación de servicios ecosistémicos (Figura 14).

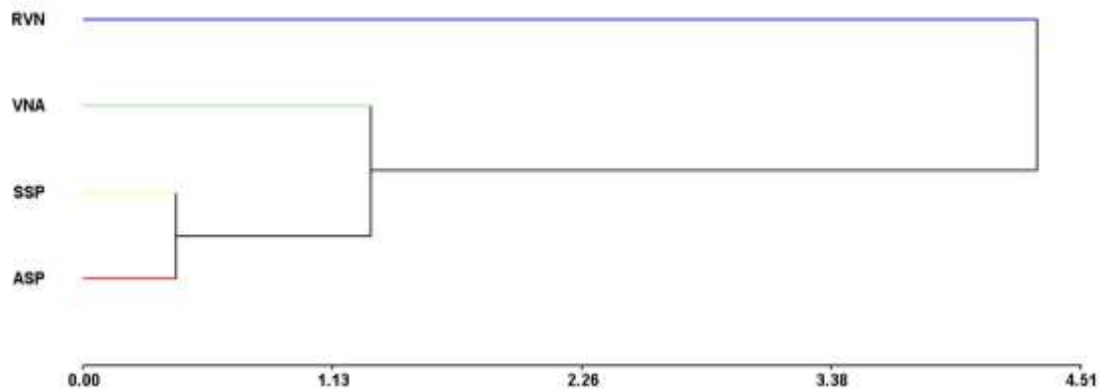


Figura 14. Análisis de conglomerados de las condiciones de estudio de acuerdo con las propiedades del suelo evaluadas.

## 5.5 Conclusiones

Los relictos de vegetación nativa en el semiárido permitieron que las propiedades del suelo se conservarán en las mejores condiciones posibles, la vegetación ha protegido al suelo de los cambios climáticos y sin la intervención humana, el sistema natural sigue su curso. La degradación física del suelo en el semiárido se presentó en los sistemas agroforestales donde la vegetación original fue modificada para introducir animales de pastoreo y plantas ajenas al ecosistema, lo que favoreció la degradación, por las condiciones climáticas, la falta de cobertura, el paso de los animales y del hombre, en contraste, la degradación química del suelo en estos entornos semisecos no se ha presentado, el manejo de los agroecosistemas se mantiene sin agroquímicos y con las precipitaciones limitantes no se presentaron sustancias químicas que alteraran al sistema.

Un ecosistema natural en regiones semiáridas, que tiene la capacidad de soportar condiciones climáticas extremas, perderá su resiliencia a medida que sea intervenido por el ser humano. Esto ocurre incluso cuando las prácticas implementadas son agroecológicas, lo que a su vez permite la degradación del suelo en los sistemas.

## 5.6 Literatura citada

- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V. y Cabarcas-Saumeth, D. E. (2022). Compost de cáscara de naranja: una alternativa de aprovechamiento y ciclo de materia orgánica en la Región Caribe de Colombia. *Entramado*, 18 (1). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.8063>
- Alawamy, J. S., Balasundram, S. K., Mohd H., A. H. & Teh, B. S. C. (2022). Response of potential indicators of soil quality to land-use and land-cover change under a mediterranean climate in the region of Al-Jabal Al-Akhdar, Libya. *Sustainability*. 14(1). 162. <https://doi.org/10.3390/su14010162>
- Banegas, N., Albanesi, A. S., Pedraza, R. O. & Dos Santos, D. A. (2015) Non-linear dynamics of litter decomposition under different grazing management regimes. *Plant Soil* 393, 47–56. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2472-y>
- Benslama, A., Khanchoul, K., Benbrahim, F., Boubehziz, S., Chikhi, F. & Navarro-Pedreño, J. (2020). Monitoring the variations of soil salinity in a palm grove in southern Algeria. *Sustainability*. 12(15). 6117. <https://doi.org/10.3390/su12156117>
- Bhattacharyya, R., Ghosh, B. N., Mishra, P. K., Mandal, B., Rao, C.S., Sarkar, D., Das, K., Anil, K. S., Lalitha, M. & Hati, K. M. (2015). Soil degradation in india: Challenges and potential solutions. *Sustainability* 7(4) pp. 3528-3570. <https://doi.org/10.3390/su7043528>
- Blanco-Sepúlveda, R., Gómez-Moreno, M. L. & Lima, F. (2024) An approach to the key soil physical properties for assessing soil compaction due to livestock grazing in mediterranean mountain areas. *Sustainability*. 16(10). 4279. <https://doi.org/10.3390/su16104279>
- Boza, J., Robles, A. B. y González R., J. L. (2014). El papel de la ganadería en las zonas áridas de Andalucía. En Junta de Andalucía y Consejería de agricultura y pesca. (Eds), *La ganadería Andaluza en el siglo XXI 1*. 241-266. [https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio\\_Ganadero\\_Tomo\\_I.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161240Patrimonio_Ganadero_Tomo_I.pdf)
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bustamante L., M., Chabla-Carrillo, J. y Barrezueta-Unda, S. (2018). La densidad y humedad crítica como indicadores de la compactación de suelos cultivados con banano. *Agroecosistemas*, 6(1), 169-174. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>
- Calderón, S. F. y Pavlova, M. (1999). Metodología para análisis químico de suelos. <http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/AnalisisDeSuelos/MetodosQuimicosSuelos.htm#3>

- Castro-Carreño, A., Delgado-Londoño, D. M. y Gonzales-Forero, R. (2022). La degradación del suelo, impactos y contexto normativo. En Castro-Carreño, A., Leguizamón-Zárate, C. A. y Fonseca-Ortiz, T. L. (Eds.). Gestión sostenible del recurso suelo, desde los modelos de seguimiento y recuperación en las fuerzas militares. Editorial *Esmic*. 11-23. DOI: <https://doi.org/10.21830/9786289544626.01>
- Chaieb, G., Abdelly, C. & Michalet, R. (2019). Interactive effects of climate and topography on soil salinity and vegetation zonation in North-African continental saline depressions. *J Veg Sci*. 30. 312–321. <https://doi.org/10.1111/jvs.12693>
- Chávez, J., Nijman, V., Sukmadewi D., K. T., Sadnyana, M. D., Manson, S. & Campera, M. (2024) Impact of farm management on soil fertility in agroforestry systems in Bali, Indonesia. *Sustainability*. 16(18) 7874. <https://doi.org/10.3390/su16187874>
- Chen, X., Zhang, X. & Zhang, Y. (2020). Effects of land use change on soil quality in a red soil region of China: An integrated assessment based on multiple indicators. *Catena*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104751>
- Chiang P., N., Yu J., C. & Lai Y., J. (2021). Soil respiration variation among four tree species at Young afforested sites under the influence of frequent typhoon occurrences. *Forests*. 12(6). 787. <https://doi.org/10.3390/f12060787>
- Coelho C., F. y Marcos S., A. (2020). Salinity of the soil and the risk of desertification the semiarid region. *Mercator* 19(1), 19002. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodríguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernandez, W., Garrido-Pineda, J. y Falla-Guzman, C. K. (2023). Índice de calidad del suelo bajo sistemas agropecuarios en el bosque seco tropical. Colombia. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694>
- Deng, J. (2020). Fitting the revised Gash analytical model of rainfall interception to Mongolian Scots pines in Mu us sandy land, China. *Trees For. People*. 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100007>
- Dong, L., Bai, X., Hu, S., Zhang, M., Wang, Y. & Yu, X. (2024). Effects of soil bacterial taxa under different precipitation gradients on the multifunctionality of the rhizosphere soils under Caragana intermedia forests. *Sustainability*. 16(14). 6032. <https://doi.org/10.3390/su16146032>
- Espinoza, M. C., Rodríguez, H. G., Silva, I. C., Correa, M. C., Castellón, A. E. E., Barragán, H. B., & Meza, M. V. G. (2020). Foliar mineral content of five shrub species with nutritional potential for small ruminants in semiarid regions in northeastern Mexico. *Ciência Rural*, 50(10). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200202>
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G. & Yadav, D. K. (2022). Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. *Sustainability*. 14(22). 14877. <https://doi.org/10.3390/su142214877>

- Fernández D., A. L., (2014). Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela. *Tierra. Nueva Etapa*, 30(48), 143-153.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geografía.
- García F., A., Valle M., R. y Monroy M., R. (2021). El patrimonio biocultural de la selva baja caducifolia, Sierra de Huautla, Morelos. 41. <http://doi.org/10.30973/inventio/2021.17.41/3>
- Haro-Martínez, A. A. y Taddei-Bringas, I. C. (2014). Sustentabilidad y economía: la controversia de la valoración ambiental. *Economía, sociedad y territorio*, 14(46), 743-767. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-84212014000300007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212014000300007&lng=es&tlng=es)
- Holanda J., E. V., Pereira, G. V. y Ferelli D., S. J. D. (2017). Los sistemas de producción de rumiantes menores en el semiárido brasileño y sus limitantes productivas. En Iñiguez Rojas L. (ed). La producción de rumiantes menores en las zonas áridas de Latinoamérica. *Embrapa*. 71-94.
- Hosseini, F. S., Seo, M. B., Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Jamshidi, M. & Choi, S. M. (2023). Geospatial artificial intelligence (GeoAI) and satellite imagery fusion for soil physical property predicting. *Sustainability*. 15(19) 14125. <https://doi.org/10.3390/su151914125>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal. San Miguel de Allende, Guanajuato. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/11/11003.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11003.pdf)
- Infante, G. S. y Zárate L., G. P. (1990). Métodos estadísticos: un enfoque multidisciplinario. Ed. Trillas, México, DF, 643.
- Ismayilov, A. I., Mamedov, A. I., Fujimaki, H., Tsunekawa, A. & Levy, G. J. (2021). Soil salinity type effects on the relationship between the electrical conductivity and salt content for 1:5 soil-to-water extract. *Sustainability*. 13(6). 3395. <https://doi.org/10.3390/su13063395>
- Kalhor, S. A., Xu, X., Chen, W., Hua, R., Raza, S. & Ding, K. (2017) Effects of different land-use systems on soil aggregates: A case study of the Loess Plateau (Northern China). *Sustainability*. 9(8). 1349. <https://doi.org/10.3390/su9081349>
- Karlen, D. L. & Rice, C. W. (2015). Soil Degradation: ¿Will Humankind Ever Learn? *Sustainability* 7(9). 12490-12501. <https://doi.org/10.3390/su70912490>
- Kawy W., A. M. A. & Darwish, K. M. (2019), Assessment of land degradation and implications on agricultural land in Qalyubia Governorate, Egypt. *Bull Natl Res cent* 43- 70. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0102-1>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability* 7(5). 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Leahy, S. C., Kearney, L., Reisinger, A., & Clark, H. (2019). Mitigating greenhouse gas emissions from New Zealand pasture-based livestock farm

- systems. *Journal of New Zealand Grasslands*, 81, 101–110. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2019.81.417>
- Lizaga, I., Quijano, L., Gaspar, L., Ramos, M. C. & Navas, A. (2019). Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. *Catena*. 172, 516–527. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.019>.
- Madrigal R., S., Cristóbal A., D., Hernández A., E. y Romo L., J. L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>
- Ma, Z., Qin, W., Wang, Z., Han, C., Liu, X. & Huang, X. (2022). A meta-analysis of soil organic carbon response to livestock grazing in grassland of the tibetan plateau. *Sustainability*. 14(21). 14065. <https://doi.org/10.3390/su142114065>
- Martínez-Alva, G., Gheno-Heredia, Y. A., Vieyra-Reyes, P., Martínez-Campos, A. R., Castillo-Cadena, J., López-Arriaga, J. A., Manzur-Quiroga, M. A. y Arteaga-Reyes, T. T. (2020). Geodisponibilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos agrícolas que representan riesgo para el ambiente y la salud de la población del Nevado de Toluca, México. *Contaminación ambiental*. 36(4), 847-856. <https://doi.org/10.20937/rica.53614>
- Mazo, N. D., Eliecer, R. J. y Castro, A. (2016). Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los sig. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 25 (1), 65-77.
- Molina R., E. (2018). Análisis de suelos y su interpretación. *Centro de Investigaciones Agronómicas*. Universidad de Costa Rica.
- Nascente, A. S., Li, Y. & Crusciol C., A. C. (2015). Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 39(3), 871–879. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140388>
- Nguyen S., H., Nguyen D., N., Nguyen Thu, N., Pham H., H., Phan H., A. & Dao C., D. (2023). Current soil degradation assessment in the Thua Thien Hue province, Vietnam, by multi-criteria analysis and GIS technology. *Sustainability*. 15(19). 14276. <https://doi.org/10.3390/su151914276>
- Norma Oficial Mexicana 021. (2002). Secretaria de recursos Naturales. URL: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Ojeda Q., L. J., Machado D., Y., Bernal C., Y., Hernández V., M. E., Font V., L., Hernández R., C. y Casanovas C., E. (2018). Índice de calidad del suelo en la Empresa Pecuaria El Tablón (Cienfuegos, Cuba). *Pastos y Forrajes* 41 (1), 13-20.
- Piscitelli, M. (2015). Degradación de suelos. UNICEN; Universidad nacional del centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands

- of upland arid and semiarid regions. *Ecol. Indic.* 75, 307–320  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- Reyes R., W. J., (2014). Procesos de compactación en un suelo vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 26 (1), 39-48.
- Rollán, A. A. y Bachmeier, O. A. (2015). Efecto de la siembra directa continua sobre el comportamiento físico-funcional de los suelos franco limosos de la región semiárida central de la provincia de Córdoba, Argentina. *Terra Latinoamericana*, 33 (4), 275-284
- Ruiz A., G. (2019). Análisis de conglomerados. *Varianza*, 16(16), 65–84.  
<https://ojs.umsa.bo/ojs/index.php/revistavarianza/article/view/409>
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Saraiva, F. M., Dubeux J., C. B. Jr., Cunha M., V. D., Menezes R., S. C., dos Santos M., V. F., Camelo, D. & Ferraz, I. (2022). Performance of forage cactus intercropped with arboreal legumes and fertilized with different manure sources. *Agronomy*. 12(8). 1887.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy12081887>
- Tamayo O., C. V. y Alegre O., J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1) e3287. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Teferi, E., Bewket, W. & Simane, B. (2016). Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. *Environ Monit Assess* 188, 83. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5086-1>
- Villanueva G., C., Lojka, B. y Cardona, C. (2023). Agroforestería para la conservación de la biodiversidad en América Latina: una revisión sistemática. 1. 1-25.
- Waheed, M., Haq, S. M., Arshad, F., Bussmann, R. W., Iqbal, M., Bukhari, N. A. & Hatamleh, A. A. (2022). Grasses in semi-arid lowlands community composition and spatial dynamics with special regard to the influence of edaphic factors. *Sustainability*. 14(22). 14964.  
<https://doi.org/10.3390/su142214964>
- Wang, J. G., Yang, W., Yu, B., Li Z., X., Cai C., F. & Ma R., M. (2016). Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China. *CATENA*. 137. 545-553.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.001>.
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*.  
<https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2023.03.002>
- Wang, X., Qi, Z., Zhang, Z., Li, W., Liu, W., Naijia, X. & Hanyu, L. (2023). Decreased soil multifunctionality is associated with altered microbial network properties under precipitation reduction in a semiarid grassland. *iMeta* 2. <https://doi.org/10.1002/imt2.106>

- Wen, D., He, N. & Zhang, J. (2016). Dynamics of soil organic carbon and aggregate stability with grazing exclusion in the inner Mongolian grasslands. *PLoS ONE*.11(1). e0146757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146757>
- Yakupoglu, G., Saltali, K., Rodrigo-Comino, J., Yakupoğlu, T. & Cerda, A. (2022). Manure effect on soil–plant interactions in Capiá Pepper crops under semiarid climate conditions. *Sustainability*. 14(20). 13695. <https://doi.org/10.3390/su142013695>
- Zepeda G., C., Burrola A., C., White O., L. y Rodríguez S., C. (2017). Especies leñosas útiles de la selva baja caducifolia en la Sierra de Nanchititla, México. *Madera y bosques*, 23(3), 101-119. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331426>
- Zhang, J., Bo, G., Zhang, Z., Kong, F., Wang, Y. & Shen, G. (2016). Effects of straw incorporation on soil nutrients, enzymes, and aggregate stability in tobacco fields of China. *Sustainability*. 8(8). 710. <https://doi.org/10.3390/su808071>
- Zhu, Y., Ali, A., Bennett, J. M., Guppy, C. & McKenzie, D. (2022). Targeting subsoil constraints in southern Queensland: Concept proof of spraying polyacrylamide for subsoil stabilisation during tillage. *Sustainability*. 14(20). 13147. <https://doi.org/10.3390/su142013147>
- Zhu, Y., Merbold, L., Leitner, S., Pelster, D. E., Okoma, S. A., Ngetich, F., Anyango, O., A., Pellikka, P. & Butterbach-bahl, K. (2020). The effects of climate on decomposition of cattle, sheep and goat manure in Kenyan tropical pastures. *Plant Soil* 451, 325–343. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04528-x>
- Zuluaga-Zuluaga, L. y Castro-Escobar, E. S. (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO<sub>2</sub> en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Revista Luna Azul*, (47), 1-20. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.47.1>