



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE SUELOS

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

**SISTEMAS AGROFORESTALES QUE BRINDAN SERVICIOS
HIDROLÓGICOS EN EL BAJÍO GUANAJUATENSE**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE

PRESENTA:

Aldo Yair Pulido Esquivel

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ



APROBADA



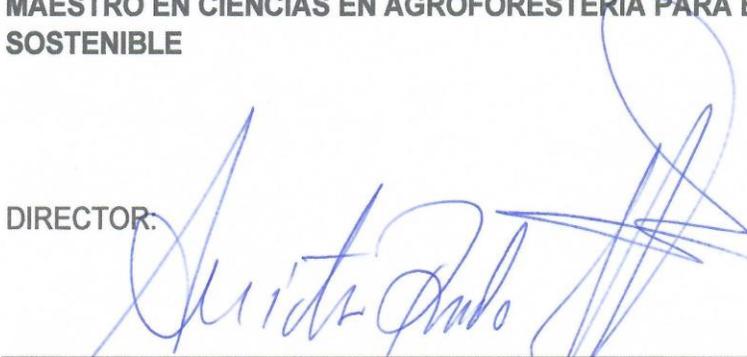
CHAPINGO, TEXCOCO DE MORA, ESTADO DE MÉXICO. FEBRERO 2024

SISTEMAS AGROFORESTALES QUE BRINDAN SERVICIOS HIDROLÓGICOS EN EL BAJÍO GUANAJUATENSE

Tesis realizada por **ALDO YAIR PULIDO ESQUIVEL** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

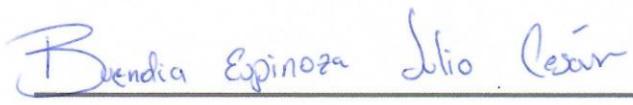
**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR:



DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

Contenido

ÍNDICE DE CUADROS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
DEDICATORIA.....	8
AGRADECIMIENTOS	9
DATOS BIOGRÁFICOS	10
RESUMEN GENERAL	11
GENERAL ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos específicos	16
1.3 Literatura citada	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Sistemas agroforestales.....	18
2.11 Definición	18
2.1.2 Principales interacciones	19
2.1.3 Importancia	20
2.2 Servicios hidrológicos de la agroforestería	21
2.2.1 Amortiguamiento de la precipitación	21
2.2.2 Control de la erosión del suelo	22
2.2.3 Recarga potencial de acuíferos	24
2.3 Suelo y agroforestería.....	25
2.3.1 Incorporación de la materia orgánica.....	26
2.4 Relación agua-suelo	27
2.4.1 Propiedades físicas y químicas del agua en el suelo.....	27
2.4.2 Dinámica del agua en el suelo	29
2.5 Sistemas agroforestales de Guanajuato	32
2.5.1 Vía Orgánica	32
2.5.2 Huamil.....	35
2.5.3 Parcelas agroforestales del INIFAP Bajío.....	35
2.6 Literatura citada	37
3. RETENCIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO Y RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DEL SEMIDESÉRTICO	42

3.1 RESUMEN	42
3.2 ABSTRACT	43
3.3 Introducción	44
3.4 Materiales y Métodos	46
3.4.1 Área de estudio.....	46
3.4.2 Sitio experimental	47
3.4.3 Diseño experimental	47
3.4.4 Especies objetivo	48
3.4.5 Muestreo de la vegetación y medición de variables	50
3.4.6 Medición de variables edafoclimáticas.....	50
3.4.7 Análisis Estadístico	53
4.5 Resultados y Análisis	53
4.5.1 Muestreo de la vegetación y medición de variables	53
3.5.2 Medición de variables edafoclimáticas.....	54
3.5.3 Recarga potencial al acuífero	60
3.6 Conclusiones.....	62
3.7 Literatura citada	63
4. MODELACIÓN DINÁMICA DEL AGUA EN SUELOS AGROFORESTALES DEL BAJÍO DE MÉXICO CON HYDRUS 2D	69
4.1 RESUMEN	69
4.2 ABSTRACT	70
4.3 Introducción	71
4.4 Metodología	73
4.4.1 Área de estudio.....	73
4.4.2 Diseño experimental	74
4.4.3 Especies objetivo	75
4.4.4 Medición de variables edafoclimáticas.....	76
4.4.5 Estimación de la lámina infiltrada en el suelo	78
2.4.6 Calibración de Hydrus 2D	84
4.4.7 Evaluación del desempeño del modelo Hydrus 2D.....	84
4.5 Resultados y análisis	85
4.5.1 Caracterización del suelo.....	85
4.5.2 Contenido de humedad en el suelo	87

4.6 Conclusiones.....	90
4.7 Literatura citada	91

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Aproximaciones de parámetros hidráulicos del suelo de acuerdo con su textura (Van Genuchten y Mualem, 1980).....	31
Cuadro 2. Promedios y desviaciones estándar de las variables dasométricas de las especies de estudio.	53
Cuadro 3. Parámetros hídricos de los horizontes de los sistemas seleccionados.	56
Cuadro 4. Recarga potencial al acuífero de los suelos de los sistemas estudiados. Medias de Tukey de mayor a menor a, b.	60
Cuadro 5. Parámetros iniciales tomado de las aproximaciones de Carsel y Parrish (1988) de acuerdo con la textura del suelo determinada por Bouyocos.....	83
Cuadro 6. Parámetros hídricos de los horizontes de los sistemas seleccionados.	87
Cuadro 7. Valores estadísticos del desempeño del modelo antes del ajuste.....	89
Cuadro 8. Valores estadísticos del desempeño del modelo después del ajuste. ...	89
Cuadro 9. Lámina infiltrada de los sitios estudiados.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pg (Precipitación), Ei (evaporación), TH y D (Flujo de traslocación), SF (flujo cortical), C (Cobertura arbórea).....	22
Figura 2. Sistema Keyline, Vía Orgánica, San Miguel de Allende Guanajuato. ...	23
Figura 3. Ciclo del Agua, Extraído de la USGS.	25
Figura 4. Representación gráfica del experimento de Darcy.....	30
Figura 5. Hortalizas en callejones con Olivos y hoja santa en Vía Orgánica, San Miguel de Allende Guanajuato.	33
Figura 6. Sistema agroforestal en el Campo experimental del INIFAP Bajío, Celaya Guanajuato.....	36
Figura 7. Área de estudio y ubicación del sitio experimental (INIFAP).....	47
Figura 8. Sistema agroforestal denso (Ar) e intercalado con cultivos (AIC) y maíz de temporal (Testigo).	48
Figura 9. Medición de la Humedad en los sistemas agroforestales.	52
Figura 10. Perfiles de los suelos de los sistemas estudiados: a) Sistema Ar, b) Sistema AIC, c) Testigo.....	56
Figura 11. Comportamiento del contenido de humedad promedio en el suelo con las especies arbóreas analizadas y el testigo.	58
Figura 12. Uniformidad de distribución promedio de la humedad del suelo en cada uno de los tres sistemas de producción, durante el periodo comprendido entre el 3 de agosto de 2022 y el 12 de octubre de 2022. Medias de Tukey de mayor a menor a, b, c.	59
Figura 13. Interacción de la humedad en el suelo entre la cobertura vegetal y la profundidad del suelo.	62
Figura 14. Área de estudio y ubicación del sitio experimental (INIFAP).....	73
Figura 15. Sistema agroforestal denso e intercalado con cultivos y maíz de temporal.	75
Figura 16. Estrategia de medición de la humedad en el suelo in situ. a) Sistema agroforestal denso (Ar), vista superior, b) Sistema agroforestal denso (Ar), vista lateral, c) Sistema de AIC, vista superior, d) Sistema de AIC, vista lateral.	78
Figura 17. Contornos de los contenidos de humedad en el suelo (humedad volumétrica %) bajo las diferentes coberturas estudiadas.	82
Figura 18. Esquema de discretización en mallado en un perfil de suelo en 2 D. Cada punto negro representa un nodo N y cada línea representa un elemento o segmento.....	82
Figura 19. Comportamiento de las precipitaciones durante el período del 03 de agosto al 12 de octubre del 2022.	83
Figura 20. Perfiles de los suelos de los sistemas estudiados: a) Sistema Ar, b) Sistema AIC, c) Testigo.....	86
Figura 21. Graficas de simulación y puntos de observación de las coberturas de todos los sitios evaluados en los diferentes sistemas.	89

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación fue realizado para aquellos científicos, ingenieros, investigadores y estudiantes a fines que estén interesados en cuantificar y estandarizar el conocimiento ancestral de los sistemas agroforestales, con el fin de robustecer el conocimiento de estos y generar presión para la creación de políticas gubernamentales que protejan, fomenten y establezcas sistemas agroforestales con fines de desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

A la Universidad Autónoma de Chapingo por brindar el espacio para el desarrollo de la maestría.

Al Posgrado de Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Al Laboratorio de Degradación y Conservación del Recurso Suelo de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la UNAM Campus Juriquilla, Querétaro por brindar el espacio para la realización de los análisis de suelo.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández por asesoramiento de esta tesis.

A la Maestra en Ciencias Elizabeth Fuentes Romero por el asesoramiento de los análisis de suelo.

A mi padre Humberto Pulido Roldán por el apoyo de traslados y trabajo de campo para el desarrollo de esta tesis.

A Innara Maatsa Pérez Camaño por su apoyo en trabajo de campo y laboratorio.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Aldo Yair Pulido Esquivel

Fecha de nacimiento: 15 de octubre de 1996

Lugar de nacimiento: Querétaro, Querétaro México

CURP: PUEA961015HQTL01

Profesión: Licenciado en Ciencias de la Tierra

Cédula profesional: 12902091

Desarrollo Académico

Bachillerato: Universidad del Valle de México, Querétaro, México, 2012-2015

Licenciatura: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México
Campus Juriquilla, Querétaro México, 2015-2020

Artículo de licenciatura: Hidrology in sierra gorda Simulating water infiltration in three soil uses of the Sierra Gorda in Querétaro, Mexico, 2023.

Desarrollo profesional

Músico y productor en Huizach, 2020-2022

Trainee en Geomecánica de México, 2021-2022

RESUMEN GENERAL

SISTEMAS AGROFORESTALES QUE BRINDAN SERVICIOS HIDROLÓGICOS EN EL BAJÍO GUANAJUATENSE

Los sistemas agroforestales son sistemas complejos que brindan servicios ambientales, pero desgraciadamente han sido poco estudiados. Por esta razón, en este trabajo se analizó el comportamiento espacio-temporal del agua en el suelo y la recarga potencial al acuífero en dos sistemas agroforestales del Bajío guanajuatense en México. Uno de los sistemas agroforestales es (Ar), con un arreglo de plantación de 3 m x 3 m, el cual cuenta con tres especies vegetales diferentes, mezquite (*Prosopis leaviagata*), copal (*Bursera graveolens*) y huaje (*Leucaena esculenta*). El otro sistema agroforestal está compuesto por cultivos intercalados (AIC) con árboles plantados en un arreglo de 3 m x 5 m; cuenta con tres especies vegetales, mezquite (*Prosopis leaviagata*), palo prieto (*Lysiloma divaricatum*) y palo blanco (*Hesperalbiazia occidentalis*). Como testigo se usó una parcela de maíz en monocultivo. Para asociar la dinámica del agua con las condiciones de los sistemas agroforestales, se obtuvieron algunas características físicas del suelo y de la cobertura vegetal, y se hicieron mediciones de la precipitación y de la humedad en el suelo durante la temporada de lluvia del 2022. Se calibró el modelo matemático bidimensional de Richards con Hydrus®, ajustando los parámetros del suelo de las funciones de Mualem-Van Genuchten. Los resultados muestran que bajo la cobertura de copal (*Bursera graveolens*) y la de palo prieto (*Lysiloma divaricatum*) es donde se retiene mayor cantidad de agua y en donde hay mayor recarga potencial al acuífero, asociado a una mayor cobertura arbórea y mayor contenido de materia orgánica en el suelo. Los resultados sugieren un impacto positivo en la retención del agua en el suelo y la recarga potencial al acuífero de los sistemas agroforestales estudiados y que el software Hydrus puede ser una herramienta de apoyo para representar la dinámica del agua en el suelo.

Palabras clave: Ar, AIC, humedad del suelo, cobertura vegetal, dinámica del agua en el suelo.

GENERAL ABSTRACT

AGROFOREST SYSTEMS THAT PROVIDE HYDROLOGICAL SERVICES IN THE BAJIO GUANAJUATENSE

Agroforestry systems are complex systems that provide environmental services, but unfortunately, they have been little studied. For this reason, in this work the spatio-temporal behavior of water in the soil and the potential recharge to the aquifer in agroforestry systems of the Guanajuato Bajío in Mexico was analyzed. One of the agroforestry systems is (Ar), with a planting arrangement of 3 m between plants by 3 m between rows of plants, which has three different plant species, mesquite (*Prosopis leaviagata*), copal (*Bursera graveolens*) and huaje. (*Leucaena esculenta*). The other agroforestry system is composed of intercropping (AIC) with trees planted in a 3 m by 5 m arrangement; It has three plant species, mesquite (*Prosopis leaviagata*), palo prieto (*Lysiloma divaricatum*) and palo blanco (*Hesperalbiazia occidentalis*). The control was a monoculture corn plot. To associate water dynamics with the conditions of agroforestry systems, some physical characteristics of the soil and vegetation cover were obtained, and measurements of precipitation and soil moisture were made during the 2022 rainy season. calibrated Richards' two-dimensional mathematical model with Hydrus ®, fitting the soil parameters of the Mualem-Van Genuchten functions. The results show that under the cover of copal (*Bursera graveolens*) and palo prieto (*Lysiloma divaricatum*) is where the greatest amount of water is retained and where there is the greatest potential recharge to the aquifer, associated with greater tree cover and greater content of organic matter in the soil. The results suggest a positive impact on soil water retention and potential recharge to the aquifer of the agroforestry systems studied and that the Hydrus software can be a support tool to represent the dynamics of water in the soil.

Keywords: dense agroforestry, intercropping agroforestry, soil moisture, vegetation cover, soil water dynamics.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo se aborda algunos antecedentes que ayudan a visualizar el problema de investigación y la justificación de esta. A su vez, se muestra algunos de los sistemas en donde se ha trabajado el tema de investigación y que han encontrado, lo que ayuda a encontrar huecos de investigación que faltan por cubrir.

La infiltración de agua en suelos es la principal causa de la recarga de los mantos acuíferos y de la disponibilidad de agua para las plantas en temporada de secas. En Guanajuato, el 99% del agua domestica es extraída de acuíferos de la cual el 60% es destinada para la agricultura y la actividad industrial que demanda el estado. En la actualidad hay 17,000 pozos que extraen alrededor de 4,000 m^3 por año, lo que excede en 1,200 m^3 por año al recurso renovable (Foster S., 2004).

Esta demanda insostenible del agua se debe a 3 factores principales: el crecimiento industrial y poblacional, la inestabilidad climática generada por el cambio climático antropogénico y la naturaleza de la zona, que es semidesértica (Ureta C. et al., 2020), (Li Y., et al., 2020). Juntando estos 3 factores tenemos un escenario en donde van incrementado la construcción de pozos cada vez con mayor profundidad, un clima que cada vez es más impredecible y con menos precipitación para los cultivos de temporal y un crecimiento industrial que demanda cada vez más agua que será más difícil de conseguir con el pasar de los años (Li Y., et al. 2020).

En México se ha evaluado la infiltración en suelos con diferentes sistemas de cultivo, sobre todo en la agricultura convencional, monocultivos. Un ejemplo de ello es un trabajo realizado en la cuenca del lago Zirahuén en Michoacán, en donde se ha usado los modelos matemáticos para estimar la infiltración como el de Green-Ampt, Brooks-Corey y Wooding a partir de ciertas propiedades físicas del suelo como la humedad, la conductividad hidráulica, la tensión y los eventos de precipitación. Con el fin de definir políticas acertadas en el manejo racional del recurso agua y evaluar la disponibilidad hídrica del a cuenca en cuestión (Hernández et al., 2017).

También se han realizado trabajo de infiltración en bosques (Luna Robles et al., 2020), un ejemplo es en estado de Durango, en donde han evaluado la infiltración en diferentes tratamientos forestales, donde concluyeron que los tratamientos de

árboles padre y los de referencia son los que mejor infiltran y por tanto, tratamiento que brindan mejores servicios hidrológicos.

Sin embargo, la infiltración en sistemas agroforestales ha sido poco estudiada. Un ejemplo de estos trabajos es en el norte de Nayarit, en donde se ha evaluado la evolución de algunas propiedades físicas del suelo, como la densidad, la porosidad, la infiltración y la capacidad de campo de un sistema agroforestal en suelos clasificados como fluvisoles y un sistema arbóreo de amapa (*Tabebuia rosea*), caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro (*Cedrela odorata*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), melina (*Gmelina arborea*), paulonia (*Pawlonia tomentosa*), primavera (*Tabebuia pentaphylla*) y teca (*Tectona grandis*), implementado en el año 2004. Durante 6 años evaluaron la evolución del contenido de materia orgánica, densidad, porosidad, capacidad de campo e infiltración. Encontrando una diferencia significativa del primer año de registro con el último año de registro, una velocidad de infiltración de 13.08 mm/h respecto a 6 años después con 20.03 mm/h (Murray Núñez et al., 2011).

Otro ejemplo es en el estado de Hidalgo donde se hace referencias a los servicios ambientales de un sistema agroforestal con agave pulquero, entre ellos, la captación de agua (Narváez Suárez et al., 2020). Sin embargo, es este último trabajo, no se evaluó la infiltración, solo se muestran las técnicas para evitar la erosión como las terrazas y zanjas. En donde empíricamente se observa una disminución en la erosión del suelo y por tanto un aumento en la infiltración.

En cuanto a climas desérticos, se ha evaluado la infiltración comparando 4 escenarios, bajo el dosel de arbustos y sobre los espacios entre estos en un pastizal y un matorral en el desierto de Chihuahua. En donde han medido la infiltración mediante la medición de la humedad con sensores TDR a través del tiempo durante 31 eventos de lluvia que se midieron mediante una estación meteorológica. Se encontró que en el matorral precipitó 290 mm de donde se infiltraron 405 mm bajo el dosel de los arbustos y 198 mm en los espacios intermedios, en comparación con el pastizal en donde precipitó 318 mm de los cuales infiltraron 248 mm bajo el dosel de los arbustos y 202 en los espacios entre los mismos (Bhark E., Small E., 2003).

Aquí se observa como la presencia de la vegetación arbustiva genera mayores niveles de infiltración, lo que implica recargas potenciales de acuíferos, que en zonas donde no están presentes.

También se ha evaluado la escorrentía y la erosión del suelo en ecosistemas semidesérticos en San Luis Potosí, en donde el propósito ha sido observar el efecto de la vegetación sobre la erosión del suelo, debajo de los arbustos, a una distancia media de ellos y en suelo sin cobertura vegetal (Barbosa-Briones E., et al. 2019). Se usó un infiltrómetro para simular 120 eventos de lluvia, 6 simulaciones por sitio, las cuales duraron 30 *min* con un promedio de intensidad de 76.54 *mm/h*. Se encontró que el promedio de escorrentía debajo de los arbustos es de 2.37 *mm/h* en comparación en una distancia media de los arbustos de 12.47 *mm/h* y una escorrentía promedio de 16.09 *mm/h* en donde no hay cobertura. En cuanto a la producción de sedimentos tenemos 6.07 *g/m²* donde no hay cobertura, 3.71 *g/m²* a una distancia media de los arbustos y 1.09 *g/m²* debajo de los arbustos (Barbosa-Briones E., et al. 2019). De tal manera que se observa claramente como la cobertura vegetal general una disminución significativa de la erosión del suelo, lo cual implica una mayor infiltración que también representa una recarga potencial de los acuíferos.

Otro ejemplo que vale la pena resaltar es el realizado en San Pedro Mixtepec en el estado de Oaxaca. Aquí también se midió la erosión bruta anual mediante una relación de la erosividad de la lluvia obtenida a través de propiedades físicas del suelo como la densidad, la textura y la porosidad, esto aunado a otras relaciones matemáticas obtenidas del manual de conservación del suelo y agua del colegio de posgraduados (1977), bajo una cobertura vegetal natural de la zona con especies como el palo mulato (*Bursera simaruba*), tepehuaje (*Lysiloma acapulsenae*), ceiba (*Ceiba petandra*), guanacastle (*Eterolobium cyclocarpum*), cuachilote (*Parmentiera aculeata*), cubano (*Swetenia humilus*) entre otras. Un sistema silvopastoril con huaje (*Leucaena leucocephala*) y moringa (*Moringa oleiferous*), y un pastizal (Sánchez-Bernal E., et al, 2013). Se encontró que la erosión bruta anual en condiciones naturales es de 208.14 *mg/año*, contrastando con el pastizal que es de 1561.05

mg/año y también con la del sistema silvopastoril que es de 312.21 mg/año (Sánchez-Bernal E., et al, 2013). Nuevamente se observa como la cobertura vegetal disminuye en gran medida la erosión del suelo tanto en condiciones naturales como en sistemas de producción silvopastoriles. A pesar de los trabajos realizados respecto a estos temas, se encuentran huecos de investigación, ya que ha sido escasa la evaluación de la infiltración en sistemas agroforestales en condiciones semidesérticas y todavía más escaso han sido el empleo de los modelos matemáticos del movimiento del agua en el suelo para estos sistemas.

1.1 Objetivo general

Evaluar los servicios hidrológicos de sistemas agroforestales presentes en el Bajío guanajuatense a partir de parámetros hidráulicos y modelos matemáticos del flujo de agua en suelo, con la finalidad de diseñar aquellos sistemas que brindan mejores servicios ambientales en semidesierto.

1.2 Objetivos específicos

- 1.- Identificar los sistemas agroforestales presentes en el Bajío guanajuatense, mediante imágenes de satélite y recorridos en campo para caracterizar la vegetación y ver su importancia relativa.
- 2.- Cuantificar los parámetros hidráulicos del suelo de los sistemas agroforestales seleccionados mediante perfiles, análisis del suelo, pluviómetros y TDR, para poder describir la dinámica del agua en el suelo de los sistemas seleccionados.
- 3.- Describir la dinámica del agua en el suelo mediante los modelos matemáticos (Gardner, Richards) para realizar una comparación de los sistemas seleccionados.
- 4.- Comparar los parámetros hidráulicos y dinámica del agua en el suelo de los sistemas de producción con la finalidad de diseñar aquellos que brindan mejores servicios hidrológicos.

1.3 Literatura citada

Hernández, J. V., Ramírez, F. P., Acevedo, D. C., García, M. C., Saucedo, F. R., & Ruíz, A. M. (2017). Evaluation of Green-Ampt infiltration equation in some

agricultural soils in Mexico, using USDA information and a modified method from Brooks and Corey. *Interciencia*, 42(9), 563–569.

Luna Robles E. O., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M. I., González Rodríguez, H., Marmolejo Monsiváis, J. G., & Béjar Pulido S. J. (2020). Ajuste de modelos empíricos de infiltración en un Umbrisol bajo diferentes tratamientos silvícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57), 132–152.

Moreno-Calles, A. I., Galicia-Luna, V. J., Casas, A., Toledo, V. M., Ramos, M. V.-, Santos-Fita, D., & Camou-Guerrero, A. (2014). Etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *ETNOBIOLOGÍA*, 12(3), 1–16.

Murray Núñez, R., Bojórquez Serrano, J. I., Hernández Jiménez, A., Orozco Benítez, M. G., García Paredes, J. D., Gómez Aguilar, J. R., Ontiveros Guerra, H., Aguirre Ortega, J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Bio Ciencias*. 1(3), 27-35.

Narváez Suárez A. U., Cruz León, A., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2020). Servicios ambientales: sistema agroforestal tradicional con plantas de maguey pulquero en la Altiplanicie, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1957–1969.

Rao, M. R., Nair, P. K. R., & Ong, C. K. (1997). Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38(1–3), 3–50.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se introduce a los temas e información como datos y herramientas en los siguientes capítulos:

1.- Se define que es un sistema agroforestal, que componentes debe de tener, como interactúan entre sí y como estos sistemas son clave para la sustentabilidad ambiental. Además de mostrar cuales son los sistemas desarrollados en el semidesierto y específicamente en el Bajío guanajuatense.

2.- Se explica como estos sistemas agroforestales son importante para brindar servicios hidrológicos tales como el amortiguamiento de la precipitación, el mejoramiento de la infiltración y la recarga potencial de acuíferos.

3.- Se explica cuál es la relación agua-suelo en la agroforestería. Cuáles son las propiedades hidráulicas de los suelos y como estas cambian debido a un manejo agroforestal.

En la siguiente sección se define que es un sistema agroforestal, cuáles son los componentes primordiales que deben de tener y cuáles de estos sistemas agroforestales se han desarrollado en el Bajío guanajuatense de acuerdo con las características ambientales de esta región.

2.1 Sistemas agroforestales

2.11 Definición

Los sistemas agroforestales son sistemas en donde los componentes son 2 o más árboles, principalmente leñosos y perennes, elementos agrícolas anuales o perennes, cultivadas, niveles altos de domesticación y en algunos casos animales domésticos o en proceso de domesticación, todos estos elementos dentro de un contexto ecológicos, cultural y económico particular (Nair, 1997). Es importante resaltar que estos sistemas tienen una historia en donde se les ha llamado sistemas tradicionales o tradición moderna (Toledo y Barrera-Bassols, 2008), ya que tienen una larga historia en México que incluso se remonta a tiempos precolombinos. Los

sistemas agroforestales están bajo manejo incipiente mediante prácticas de tolerancia, fomento, protección y siembra de grupos de plantas y especies particulares (Casas et al., 1997). Teniendo en cuenta que los componentes de la agroforestería son los forestales, agrícolas y las unidades sociales, el estudio de la agroforestería se basa en las interacciones de estos componentes (Krishnamurthy y Ávila, 1999). El estudio de la agroforestería se basa en las interacciones biológicas y ecológicas de los componentes antes mencionados en un medio determinado, pero también se tiene que hacer un especial enfoque desde el estudio social, ya que se tratan de sistemas desarrollados por diferentes etnias y grupos mestizos que han perdurado a lo largo de los siglos, las cuales han acumulado un conocimiento empírico que ha permitido que se desarrollen hasta el día de hoy, lo que se llama una aproximación biocultural (Moreno-Calles et al., 2013).

2.1.2 Principales interacciones

Ya que se definió que son los sistemas agroforestales y la agroforestería, se puede empezar a decir porque estos sistemas son clave para la sustentabilidad de los ecosistemas. La clave está en el punto más importante de la definición, las interacciones biológicas y ecológicas (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Dentro de las principales interacciones que hay en la agroforestería están: árbol perenne-suelo, árbol-planta agrícola, árbol-animal y animal-suelo. Dentro de la primera interacción árbol-suelo podemos mencionar primeramente el reciclaje de nutrientes por parte del árbol mediante el aporte de materia orgánica al suelo, lo que permite que se mejore la estructura del suelo, eso significa nutrientes disponibles para las plantas y una mejor aireación (Fonte S. et al., 2010).

En la segunda interacción árbol-planta agrícola, el principal efecto es la sombra, la cual puede ser benéfica o perjudicial, eso va a depender del tipo de árbol, el tipo de planta de interés agrícola y las condiciones ambientales. En el caso del café bajo sombra es benéfico, ya que esto produce que el café tenga un crecimiento más lento, lo cual le atribuye características que demanda el mercado como son el olor, el sabor, la textura, etc. (Suárez-Salazar J. C. et al., 2015). Esto sin mencionar que

también se pagan bonos de carbono en estos sistemas agroforestales por la gran cantidad de carbono que secuestran (Soto-Pinto L., et al., 2010).

En las interacciones que involucran a los animales tenemos las que tienes con los árboles y con el suelo. En cuanto a la interacción árbol-animal está presente también el efecto sombra, los animales al estar bajo la radiación directa del sol durante todo el tiempo generan estrés, estrés que se puede traducir en deficiencias en la producción ya sea de leche, carne o huevo (Nahed-Toral J., et al., 2013). Los animales excretan materia orgánica al suelo, la cual mejora la estructura e incrementa los nutrientes.

Estas son algunas de las interacciones más importantes dentro de los sistemas agroforestales, claramente hay muchas más y también estamos dejando de lado los estudios de tipo sociales y económicos, no porque no sean importantes si no porque no corresponden realizar tales estudios con esos enfoques para este trabajo.

Una vez que se han mencionado algunas de las interacciones mas importantes en torno a la agroforestería, es momento de resaltar la importancia que tienen estos sistemas en el contexto histórico en el que vivimos.

2.1.3 Importancia

No es de extrañar que hoy en día todo el mundo vive en condiciones ambientales insostenibles, debido en gran parte a el modelo económico actual que se lleva a cabo en todo el mundo. Esto ha generado por un lado perdida de la biodiversidad (Cardiale B. J., et al. 2012), perdida del recurso suelo (Li L., et al. 2009), contaminación ambiental (Choudhury A. T., Kennedy I. R., 2005), cambio climático (Wheeler T., Von Braun J., 2013), entre otros problemas de tipo social y económico como la pobreza y el hambre (Toledo V. M., Garrido D., Barrera-Basols N., 2013). El escenario actual mundial carece de una visión optimista para el futuro, pero la agroforestería resurge como una ciencia en la cual podemos encontrar una posible solución. Los sistemas agroforestales ya existían desde hace siglos, los cuales eran desarrollados por diferentes grupos étnicos y mestizos, muchos de ellos perduran hasta el día de hoy, esto es posible ya se tratan de sistemas sostenibles que se regeneran constantemente (Moreno-Calles A. I., Toledo V. M., Casas A., 2013).

Desde hace unos 30 años, la agroforestería resurge ahora como una ciencia en donde se pretende occidentalizar el conocimiento milenario de muchas comunidades con el fin de llegar a la sustentabilidad (Nair, 1997). Actualmente existen muchos sistemas agroforestales en México, de los cuales hay evidencia científica de que están secuestrando carbono, están disminuyendo la erosión hídrica y eólica del suelo, están mejorando las propiedades físicas y químicas de los suelos, están dando mejor calidad de vida a los animales, lo que se traduce también en mayor producción, aumentan la biodiversidad y por último pero no menos importante, aumenta la belleza escénica, factor que no se había tocado hasta este punto pero es igual de importante que los anteriores. Todos estos factores ayudan a llegar a la sustentabilidad de los ecosistemas, algo de vital importancia en los tiempos en los que se viven ya que de no cambiar el modelo de producción industrial y de crecimiento económico infinito, todos los seres vivos incluyendo la humanidad lo podría pagar bastante caro.

Ya que se resaltó la importancia de los sistemas agroforestales y el estudio de estos, en la siguiente sección se hablará específicamente de los servicios hidrológicos que ofrece la agroforestería.

2.2 Servicios hidrológicos de la agroforestería

En esta sección se hablará de los servicios hidrológicos que ofrece la agroforestería, los cuales son el amortiguamiento de la precipitación, el control de la erosión del suelo y la recarga potencial de acuíferos.

2.2.1 Amortiguamiento de la precipitación

Independientemente de la geomorfología, el clima o el tipo de vegetación, la presencia de árboles en el ecosistema amortigua el impacto de las gotas de lluvia (Nair, 1997). Esto ocurre por 2 factores principales, el primero que la copa de los árboles actúa como un filtro, parte del agua que cae sobre la copa llega al suelo en menor cantidad, lo que se conoce como flujo de traslocación. Por otro lado, los árboles redireccionan el agua que cae sobre sus copas y la canalizan por sus ramas

hasta llegar al tronco, por último, esta agua llega al suelo en forma de flujo cortical (Flores-Ayala E. et al., 2016). (Figura 1).

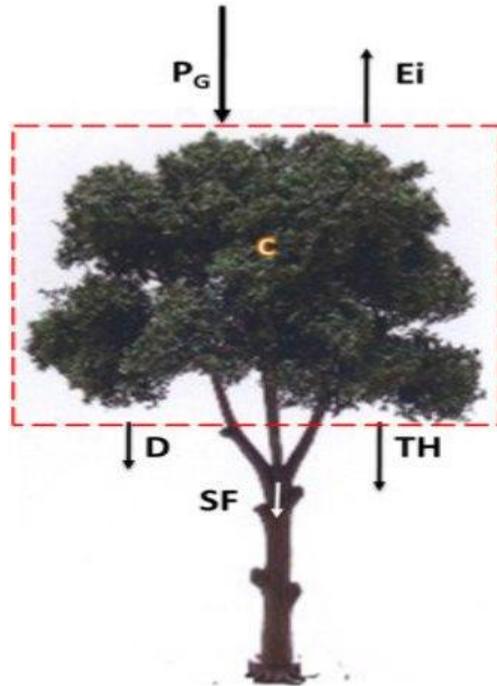


Figura 1. P_G (Precipitación), E_i (evaporación), TH y D (Flujo de traslocación), SF (flujo cortical), C (Cobertura arbórea).

Este efecto de la vegetación tiene 2 implicaciones principales, por un lado, la disminución de la erosión del suelo y por otro el aumento de la infiltración del agua en el suelo, lo que significa una recarga potencial de acuíferos. Primeramente, se hablará los efectos en cuanto a la disminución de la erosión del suelo.

2.2.2 Control de la erosión del suelo

Es bien sabido que el suelo es un recurso no renovable sumamente importante dentro del funcionamiento de los ecosistemas (Porta J., 1994). Pero en los últimos años la pérdida de este recurso por erosión hídrica ha generado pérdidas significativas (Cisneros J., 2012). La erosión hídrica depende de factores geomorfológicos como la pendiente, el clima, el tipo de suelo y lo que concierne a la agroforestería, la cobertura vegetal. Independientemente de los factores antes mencionados, sin lugar a duda el más influyente sobre la erosión es la cobertura

vegetal, ya que como se mencionó en la sección anterior, amortigua el impacto de las gotas de lluvia, de forma que el agua que llega al suelo llega en forma de flujos y no de lluvia directa (Flores-Ayala E. et al., 2016). El agua de lluvia que llega en forma de flujos al suelo gracias a la presencia de los árboles permite en instancia disminuir la erosión, ya que la presión del agua sobre el suelo es menor (Cisneros J., 2012). Claramente si hay pendiente o una ladera en el sistema, la erosión es mayor. Pero en un sistema agroforestal, independientemente si hay pendiente o no, siempre la erosión será menos en presencia de árboles que en sistemas donde no los hay (Murray-Núñez F., 2014). Ya que dentro de las tecnologías agroforestales esta las terrazas, las plantaciones a curvas de nivel (sistema Keyline), plantaciones perpendiculares a la pendiente, las barreras vivas y las cortinas rompeviento, hablando sobre control de erosión eólica (Krishnamurthy L., Ávila M., 1999). (Figura 2)



Figura 2. Sistema Keyline, Vía Orgánica, San Miguel de Allende Guanajuato.

Ahora bien, una vez que se ha disminuido el impacto de la precipitación, la presión del agua sobre el suelo disminuye, lo que disminuye la erosión y las pérdidas de un

recurso no renovable, el agua que llega al suelo solo le queda un camino, adentrarse en el suelo, lo que aumenta la infiltración, eso implica una recarga potencial de acuíferos. Fenómeno que se detallará en la siguiente sección.

2.2.3 Recarga potencial de acuíferos

La infiltración del agua en el suelo es un fenómeno en el cual el agua de lluvia o de otro origen, se introduce en el suelo. Este es un fenómeno complejo en donde depende de varias propiedades físicas y químicas del suelo, propiedades que se describirán en la siguiente sección del marco teórico. Pero por ahora se puede decir que si hay una mayor cantidad de agua con poca presión que llega al suelo debido a la intercepción de la lluvia por parte de la copa de los árboles, la cantidad de agua que logrará infiltrarse será mayor (Lozano-Parra J., 2015). Por ende, el agua que logra infiltrarse en el suelo puede tener diferentes destinos, uno puede ser que el agua se mueva de forma subsuperficial y desembocar en un manantial o un arroyo, pero otro puede ser que llegue a un acuífero (Selker J., 1999). Eso dependerá de la geomorfología de la zona de estudio, el tipo de cuenca, el tipo de suelo y las características geológicas de la zona principalmente (Vélez M., 2004). La agroforestería ofrece el servicio de recarga de acuíferos, pero de manera potencial, se aclara este punto ya que la recarga de acuíferos depende de múltiples factores y no necesariamente el agua que se infiltró en el suelo llegará a un acuífero. Pero en primera instancia, si se está infiltrando mayor cantidad de agua al suelo gracias al amortiguamiento de lluvia, se puede intuir que también hay mayor recarga de acuíferos (Figura 3).



Figura 3. Ciclo del Agua, Extraído de la USGS.

Una vez que se describieron los servicios hidrológicos de los sistemas agroforestales, se puede describir a mayor detalle cuales son los efectos que tiene la agroforestería sobre el suelo, cuáles son los efectos que produce la agroforestería sobre el suelo para que se mejoren sus propiedades hídricas. Eso se explicará e la siguiente sección.

2.3 Suelo y agroforestería

En esta sección se abordará lo efectos que tiene la agroforestería sobre el suelo, como lo es la incorporación de materia orgánica, el removimiento del suelo por parte de las raíces de los árboles, la sombra y como estos efectos mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, en cuanto a la retención de humedad y la dinámica del agua en el suelo.

El suelo es unos de los componentes principales de los ecosistemas, para algunos autores es el más importante (Porta J., 1994). El suelo se puede definir como un ente en donde interactúa una fase sólida conformada por minerales derivados de la roca madre y materia orgánica sólida, una fase líquida conformada principalmente por agua y algunos ácidos derivados de la materia orgánica y una fase gaseosa que comparte una composición similar a los gases de la atmósfera, de hecho, para

algunos autores, consideran que el suelo es un ente vivo o el material más complejo de la naturaleza (Brady y Weil, 1999, Porta J., 1994).

A que se ha definido que es el suelo se puede empezar a describir algunos de los efectos que tiene la agroforestería sobre el suelo, empezando por describir el efecto que tiene la incorporación de la materia orgánica por parte de los árboles.

2.3.1 Incorporación de la materia orgánica

Debido a la presencia de árboles en los sistemas agroforestales, existe una incorporación constante de materia orgánica que formará el mantillo del suelo y posteriormente se incorporará a la estructura del suelo (Young A., 1997). La incorporación de la materia orgánica mejora la estructura del suelo, lo que permite la formación de agregados granulares en el suelo y mejora la fertilidad del suelo (Fonte S., 2010). Esto ocurre por la actividad de la biota del suelo, los organismos del suelo descomponen la materia orgánica que cae al suelo en moléculas más simples, que después arrastran a través del horizonte superficial del suelo, por lo general, arrastrando estos compuestos orgánicos más simples que se van incorporando con la fase mineral del suelo (Porta J., 1994). Este fenómeno, por un lado, aumenta la fertilidad del suelo, ya que los componentes órgano-minerales tienen una actividad química tremenda, retenido nutrientes y agua disponibles para las plantas (Brady y Weil, 1999). Pero también se forman agregados granulares, lo que genera una mejor estructura del suelo (Young A., 1997).

En la bibliografía se puede encontrar varios artículos relacionados a el efecto de la materia orgánica en el suelo de sistemas agroforestales asociados a el ciclaje de nutrientes (Gama-Rodrigues A., 2011), en cuanto a el aumento de la fertilidad (Pinho R. y Alfaia S., 2012) y en cuanto a el secuestro de carbono en el suelo (Soto-Pinto L., 2010). Pero en cuanto al cambio de las propiedades hídrica del suelo en los sistemas agroforestales ha sido poco estudiado, en teoría como esta mejorado la agregación y la estructura del suelo, por ende, también se deben estar mejorando las propiedades físicas en general incluidas las hidráulicas.

Ya que se explicó el efecto de la materia orgánica sobre el suelo de sistemas agroforestales, es momento de describir otro efecto importante de los árboles sobre el suelo, la sombra.

2.3.2 Sombra

El efecto de la sombra en la agroforestería es muy importante no solo en la interacción árbol-suelo, sino también en todas las interacciones que involucren el árbol. Evidentemente, el árbol solo deja pasar cierta cantidad de radiación al suelo, lo que disminuye la evaporación después de un evento de lluvia, en comparación a un sistema de producción en donde no hay cobertura vegetal (Quinkenstein A., 2009). Entonces, la disminución de la radiación directa sobre el suelo disminuye la energía calorífica en el suelo, lo que disminuye la evaporación y la pérdida de agua.

Una vez que se describieron los principales efectos de la agroforestería en la relación agua-suelo, en la siguiente sección se describirán las propiedades físicas y químicas del suelo que cambian debido a los efectos que producen la agroforestería.

2.4 Relación agua-suelo

El estudio del agua en el suelo es toda un área del conocimiento en donde intervienen ciencias desde la física hasta la geomorfología. Pero en este trabajo se delimitará a mencionar las propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con el agua, para entonces relacionarlas con los efectos que produce la agroforestería. Primeramente, se mencionarán algunas propiedades físicas y químicas relacionadas con el agua.

2.4.1 Propiedades físicas y químicas del agua en el suelo

En cuanto a las propiedades físicas más importantes relacionadas con el agua en el suelo tenemos la conductividad hidráulica (K), la tensión del suelo (ψ), la humedad del suelo (θ), la constante de Gardner (α), la capacidad de campo (cc), el punto de marchitez permanente (pmp), el punto de saturación (ps), todas estas propiedades relacionadas con la textura del suelo (Selker, 1999). En cuanto a las propiedades químicas están el contenido de solutos, el tipo de arcilla y la cantidad

que tenga el suelo y el contenido de materia orgánica (Bohn H., Myer R. y O'Connor G., 2002). Primeramente, se describirán las propiedades físicas.

La conductividad hidráulica K es la velocidad a la que se mueve el agua en el suelo, la cual cambia dependiendo el contenido de humedad θ . La humedad θ es el contenido de agua en el suelo, generalmente expresado en porcentaje (cm^3/cm^3). La tensión del suelo ψ es la presión que ejerce el suelo sobre el agua, convencionalmente expresada de forma negativa y con unidades de longitud. La constante de Gardner es un valor relacionado a las condiciones del suelo, que relaciona la conductividad hidráulica y la tensión, propiedades que son inversamente proporcionales. La capacidad de campo se define como la cantidad de agua que logra retener el suelo después de haberse saturado, mientras que el punto de marchitez permanente es la cantidad de agua que queda en el suelo pero que las plantas ya no pueden acceder a ella. Por último, el punto de saturación es la máxima cantidad de agua que puede tener un suelo (Jury W., 2004). Todas estas propiedades están relacionadas directamente con la textura del suelo y la porosidad. Si un suelo tiene una textura más arenosa, su porosidad es mayor y por tanto la conductividad es mayor también, pero la tensión al ser inversamente proporcional disminuye, al igual que la capacidad de retener agua. Diferente a un suelo con mayor proporción de arcillas, la porosidad disminuye al igual que la conductividad, pero con una capacidad de retención más grande y una tensión mayor (Selker, 1999). Estas propiedades cambian dependiendo el uso del suelo, por ejemplo, en un sistema natural o en un sistema silvopastoril, capacidad de infiltración y la capacidad de retención de humedad es mayor que en sistemas de pastos cultivados y naturales (Leyva S., Baldoquín A., Reyes M., 2018). En cuanto a sistemas perturbados también se ha observado que la agroforestería mejora estas propiedades hídricas del suelo, que se provoca que aumente la infiltración y la retención de agua para las plantas (Murray-Núñez R., 2014). Aunque se sabe que la agroforestería mejora las propiedades físicas de los suelos, ha carecido de una explicación cuantitativa del fenómeno y sobre todo en sistemas agroforestales del semidesierto, ya que la investigación sobre la infiltración y el movimiento del agua

en el suelo se ha enfocado en la irrigación de sistemas de agricultura convencional (Hernández P., 2017).

En cuanto a las propiedades químicas se tiene que resaltar el contenido de materia orgánica. El contenido de materia orgánica en el suelo tiene varias funciones, mejora la estructura del suelo, favorece la formación de agregados granulares, favorece el intercambio catiónico, incrementa la cantidad de nutrientes y agua disponibles para las plantas (Porta J., 1994). La incorporación de materia orgánica al suelo depende principalmente de del clima y el factor biológico, tanto vegetal como animal. La incorporación de materia orgánica al suelo mejora la fertilidad y la biodiversidad en el suelo, lo que en teoría también mejora la porosidad y la infiltración (Pinho R., 2012). Pero carece la información en cuanto a la influencia que tiene la incorporación de materia orgánica para demostrar mejoras en las propiedades hídrica de los suelos, ya que los estudios en este campo se han enfocado a estudios de fertilidad y secuestro de carbono (Gama-Rodrigues A., 2011). En cuanto a la concentración de solutos, entre mayor cantidad de solutos contenga el suelo, disminuye la infiltración y aumenta la retención. Esto sucede ya que las sales retienen el agua por su capacidad eléctrica, pero el agua que retienen no puede ser absorbida por las plantas ya que el balance osmótico se inclina hacia las sales (Bohn H., 2002). En cuanto al tipo de arcilla, las arcillas con relación 2:1 tienen una mayor capacidad eléctrica que las arcillas con relación 1:1, por tanto, si un suelo tiene mayor cantidad de arcillas con relación 2:1 es probable que tenga mayor capacidad para retener agua que un suelo con arcillas 1:1 (Brady N. y Weil R., 1999).

Una vez que se explicó cuáles son las propiedades físicas y químicas relacionadas con el agua en el suelo, a continuación, se explicará cómo es el movimiento del agua en el suelo y como es que cambia dependiendo de uso que tenga.

2.4.2 Dinámica del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo es un fenómeno complejo, pero con una expresión matemática satisfactoria. La primera aproximación a la descripción del movimiento del agua en el suelo es la del científico e ingeniero francés Henry Darcy

en 1857, en donde relaciono una diferencia presiones hídricas con una constante que depende del material poroso, lo que resulta en el flujo. La expresión matemática es la siguiente:

$$Q = -K_s \nabla H$$

en donde Q es el flujo (L^2 / t), K_s es la conductividad hidráulica saturada (L/t) y ∇H es el gradiente de potencial hidráulico (L), que no es mas que una diferencia de presiones en el experimento que diseñó ($\frac{H_1 - H_2}{L}$) (Figura 4).

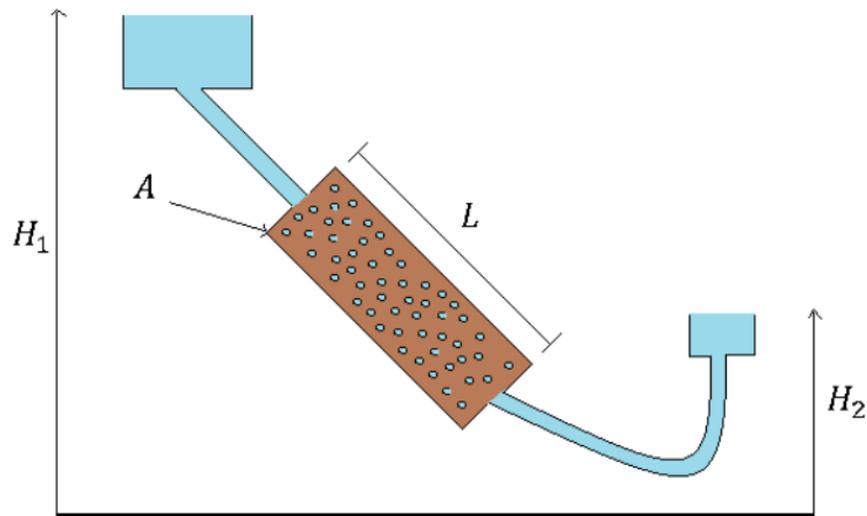


Figura 4. Representación gráfica del experimento de Darcy.

Cabe destacar que la ecuación de Darcy solo es válida para medios saturados y estacionarios. Para encontrar una relación más cercana a la realidad se tiene que considerar primeramente que la conductividad hidráulica no es constante, esta relación es dada por Gardner en 1958:

$$K(\psi) = K_s * e^{\alpha\psi}$$

En donde $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica no saturada (L/t), K_s es la conductividad hidráulica saturada (L/t), α es la constante de Gardner (L^{-1}) y ψ es la tensión del suelo (L).

Ahora para poder llegar a una expresión que explique el movimiento del agua en el suelo se tienen que hacer uso de las ecuaciones diferenciales, ya que una expresión matemática de ese tipo permite identificar un fenómeno en el espacio y el tiempo, que es precisamente lo que se requiere para describir el movimiento del agua en el suelo. Esta expresión es dada por el científico e ingeniero Richards en 1933, la cual es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{d\psi}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right)$$

en donde θ es la humedad del suelo (L^3), t es el tiempo (t), z es la profundidad del suelo, K la conductividad hidráulica (L/t), ψ la tensión del suelo (L).

Esta ecuación diferencial parcial permite describir el flujo del agua en el suelo de manera espaciotemporal. Aquí solo se está considerando el eje z pero también se puede expresar para las 3 dimensiones (Selker, 1999). Esta ecuación por su nivel de complejidad, resulta poco práctico resolverla de forma analítica, por lo que se opta mejor por usar métodos numéricos para resolver este tipo de ecuaciones, como el método de diferencias finitas o elemento finito.

Esta ecuación se alimenta de los parámetros hidráulicas que se mencionaron con anterioridad, como la humedad del suelo, la conductividad hidráulica y la tensión del suelo. La textura es el parámetro principal que relaciona estas propiedades hídricas, científicos como van Genuchten (Van Genuchten M., 1980) y Mualem (Mualem Y., 1978) relacionaron estas propiedades hidráulicas y otras más para cada tipo de textura el suelo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Aproximaciones de parámetros hidráulicos del suelo de acuerdo con su textura (Van Genuchten y Mualem, 1980).

Parámetros ajustados

Contenido de humedad residual (θ_r) ($cm^3 cm^{-3}$)	0.09
Contenido de humedad a saturación (θ_s) ($cm^3 cm^{-3}$)	0.65
Valor (α) ($1/cm$)	0.01
Valor (N)	1.31
Conductividad hidráulica saturada (K_s) (cm/dia)	6.24
Factor de conectividad de poro (L)	0.50

Calculando la textura del suelo se pueden conocer las propiedades hidráulicas relacionadas a esa textura específica. Los trabajos relacionados a la dinámica del agua en el suelo se han enfocado a estudios en irrigación, muy pocos en sistemas forestales y todavía menos para sistemas agroforestal. También en estos estudios ha carecido la relación de la materia orgánica con la dinámica de agua el suelo, restringiéndose solo a propiedades físicas del suelo (Hernández P., 2017).

En esta sección se explicó la relación y el rol que tiene el suelo en la agroforestería, las propiedades físicas y químicas que tiene el suelo relacionadas con el agua y como estas cambian por una intervención agroforestal, para terminar por explicar cómo es la dinámica del agua en el suelo, sus expresiones matemáticas y como se relacionan con la textura del suelo. Quedan huecos de investigación con relaciones químicas del suelo.

En el siguiente capítulo del marco teórico se abordarán cuáles son los sistemas agroforestales presentes en el Bajío guanajuatense, cual es la vegetación nativa y típica de estos sistemas, el tipo de suelo y el clima.

2.5 Sistemas agroforestales de Guanajuato

En este capítulo se describirán los sistemas agroforestales presentes en el estado de Guanajuato México. Muchos de ellos no están documentados en revistas científicas, por lo que la descripción de los sistemas que se mencionarán será descrita de primera mano.

2.5.1 Vía Orgánica

Vía Orgánica es una organización mexicana sin fines de lucro cuya misión es promover la alimentación saludable y un futuro sustentable a través de la promoción del conocimiento y la práctica de la agricultura regenerativa orgánica, el comercio

justo, la justicia social, la vida sostenible y la protección del planeta. Su visión es que México alcance una agricultura orgánica, la justicia social, el comercio local y la vida sostenible.

Esta organización se formó en el año 2009 como una organización hermana de la Asociación de Consumidores Orgánicos (OCA por sus siglas en inglés), una red nacional de consumidores orgánicos de los Estados Unidos a favor de la salud, la justicia, la sustentabilidad, la paz y la democracia.

Los fundadores de Vía Orgánica son Rosana Álvarez, nativa de San Miguel de Allende, Guanajuato y presidente de Vía Orgánica, junto a Rose Welch y Ronnie Cummins fundadores de la OCA, decidieron abrir las puertas de Vía Orgánica Tienda en Colonia Guadalupe en 2009, con el fin de conectar a los pequeños agricultores locales con los consumidores que buscan una deliciosa comida producida localmente y de manera sana en San Miguel de Allende, Guanajuato.

En Vía Orgánica cuentan con diferentes sistemas agroforestales como los son los huertos caseros, sistema keyline o curvas de nivel, callejones, silvopastoriles con borregos y otro con aves (gallinas ponedoras) (Figura 5).



Figura 5. Hortalizas en callejones con Olivos y hoja santa en Vía Orgánica, San Miguel de Allende Guanajuato.

Huertos caseros

Dentro de sus huertos caseros cuentan con hortalizas como el jitomate (*Solanum lycopersicum*), zanahoria (*Daucus corata sativus*), albahaca (*Ocimum basilicum*), romero (*Salvia rosmarinus*), penino (*Cucumis sativus*), calabaza (*Cucurbita pepo*), entre otras. En estos huertos caseros también tenían plantas aromáticas con el fin de atraer a polinizadores y ahuyentar plagas.

Callejones

En los callejones tenía igualmente hortalizas, pero asociadas con árboles, con olivos (*Olea europaea*), granada (*Punica granatum*) y guayaba (*Psidium guajava*).

En otra sección también contaban con callejones de mezquite (*Prosopis juliflora*) con cactáceas como los nopales (*Opuntia ficus indica*) y garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*).

Keyline o curva de nivel

En esta sección del terreno de Vía Orgánica hay una pendiente en donde se ha observado erosión del suelo, por tanto, decidieron plantar magueyes (*Agave salmiana*) y mezquite (*Prosopis juliflora*). Aquí los magueyes siguen las curvas de nivel con el fin de disminuir la erosión del suelo, y los mezquites están plantas de forma dispersa.

Silvopastoril con borrego

Aquí los borregos se encuentran en corral, pero cuando es la época de lluvias salen a pastar a los sistemas de keyline, para que deshieran el terreno. Cuando están en corral, son alimentados con la cocción de las hojas de maguey, ricas en proteínas.

Silvopastoril con gallinas

En esta sección del terreno las gallinas se encuentran en pastoreo libre, alimentándose de gusanos, pastos y de la cocción del maguey.

2.5.2 Huamil

En otra parte del estado de Guanajuato, específicamente en el Valle de Santiago, se ha desarrollado otro tipo de sistema agroforestal llamado huamil (Moreno-Calles, 2013). En el cual se involucra la apertura de áreas al cultivo dentro de los escurrimientos rocosos de los cerros. Durante la roza se toleran a especies como garambullo (*Myrtillo-cactus geometrizans*) y pitaya (*Stenocereus queretaroensis*), que proporcionan frutos comestibles, así como mezquite (*Prosopis laeviagata*), principalmente por su sombra. Los nopales y xoconostles en estos sitios son particularmente importantes y se pueden encontrar variedades toleradas, fomentadas y plantadas en los huamiles, así como en cercos vivos y huertos. Las variedades incluyen: hartón, cardón y sangre de toro (*Opuntia streptacantha*), lisita y sotaleña (*O. hyptiacantha*), apastillada silvestre (*O. megacantha*), xoconostle perón (*O. lasiacantha*), xoconostle amarillo, xoconostle barrilito, xoconostle cenizo, xoconostle colorado (*O. joconostle*), nopal blanco chico, nopal blanco grande y nopal blanco espada (*O. atropes*) (Moreno-Calles, 2013).

2.5.3 Parcelas agroforestales del INIFAP Bajío

En el campo experimental del INIFAP Bajío cuentan con 2 parcelas con arreglo agroforestal, una llamada Arboretum, en donde tienen arreglos en callejones con especies nativas del semidesierto de México como es mezquite (*Prosopis laeviagata*), palo prieto (*Lysiloma divaricatum*), huaje (*Leucaena esculenta*), palo verde (*Parkinsonia aculeata*), etc. La otra parcela cuenta también con especies de este tipo igualmente en callejones, pero más abierto, de 6 m, mientras que el Arboretum solo tiene espacios de 3 m entre los callejones (Figura 6).



Figura 6. Sistema agroforestal en el Campo experimental del INIFAP Bajío, Celaya Guanajuato.

2.5.4 Condiciones ambientales de Guanajuato

Todos estos arreglos agroforestales desde Vía Orgánica, el huamil y los que hay en el campo experimental del INIFAP Bajío fueron establecidos de acuerdo a las condiciones climáticas del Bajío, Guanajuato. Ya que este es un principio fundamental de la agroforestería, en donde también se usan especies nativas de la zona y árboles y arbustos con usos múltiples adaptados a las condiciones ambientales de la zona en donde se piensen establecer (Nair, 1994).

Guanajuato tiene una altitud de los 1700 a 2000 metros sobre el nivel del mar. Debido a que geográficamente se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, las condiciones climáticas son más secas por el efecto de sombra orográfica, de aquí el nombre del Bajío, como un lugar más bajo de las cordilleras que rodean la zona. Esto nos deja un lugar con un clima (A)C(w1) de acuerdo con Koppen, es decir, semicálido semihúmedo, con lluvias en verano y temperaturas que oscilan entre los 3°C a 31°C (INEGI, 2020).

En cuanto a las especies de uso múltiple de la zona están mezquite (*Prosopis laeviagata*), una especie arbórea leñosa, con alto contenido nutricional por sus vainas y fijadora de nitrógeno por ser leguminosa. Copal (*Bursera graveolens*), una especie arbórea apreciada por su resina también usaba como cerco vivo. Huaje (*Leucaena esculenta*), una especie forrajera que también es fijadora de nitrógeno. Las *Opuntias*, desde los nopales hasta los xoconostles, todas estas especies tiene un alto valor nutricional, además de ser retenedoras de suelo.

En este capítulo se explicó cuáles son los sistemas agroforestales presentes en Guanajuato, específicamente en el Bajío, cual es el tipo de clima y algunas de las especies nativas con usos múltiples más representativas de la zona.

En este marco teórico se abordó, primeramente, que es la agroforestería, sus componentes y sus principales interacciones. Después se explicó cuáles son los servicios hidrológicos que ofrece la agroforestería. Posteriormente, se explicó cuáles son los efectos de la agroforestería en el suelo, como este efecto cambia algunas propiedades físicas del suelo, sobre todo las relacionadas con el agua. Para finalizar con los sistemas agroforestales presentes en el Bajío guanajuatense. En el siguiente capítulo de la tesis se abordará los 2 artículos científicos que se realizaron.

2.6 Literatura citada

Bohn, H. L., Myer, R. A., & O'Connor, G. A. (2002). *Soil chemistry*. John Wiley & Sons.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). Soil organic matter. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 446-490.

Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., ... & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59-67.

Casanellas, J. P., Reguerín, M. L. A., & de Laburu, C. R. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.

- Casas A., Caballero J., Mapes C., Zárate S., (1997). Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 61:31-47.
- Choudhury, A. T. M. A., & Kennedy, I. R. (2005). Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problems. *Communications in soil science and plant analysis*, 36(11-12), 1625-1639.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., González, J., Reynero, M., Diez A., ... & Degioanni, A. (2012). Erosión hídrica. *Principios y técnicas de manejo*.
- Flores Ayala, E., Guerra De la Cruz, V., Terrazas González, G. H., Carrillo Anzures, F., Islas Gutiérrez, F., Acosta Mireles, M., & Buendía Rodríguez, E. (2016). Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 65-76.
- Fonte, S. J., Barrios, E., & Six, J. (2010). Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*, 155(3-4), 320-328.
- Fonte, S. J., Barrios, E., & Six, J. (2010). Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*, 155(3-4), 320-328.
- Gama-Rodrigues, A. C. (2011). Soil organic matter, nutrient cycling and biological dinitrogen-fixation in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 81(3), 191-193.
- Hernández J., Ramírez, F., Acevedo, D. C., García, M. C., Saucedo, F., & Ruíz, A. M. (2017). Evaluation of Green-Ampt infiltration equation in some agricultural soils in Mexico, using USDA information and a modified method from Brooks and Corey. *Interciencia*, 42(9), 563-569.
- Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil physics*. John Wiley & Sons.

- Krishnamurthy L. y Ávila M., (1999). *Agroforestería Básica*. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México D.F.
- Leyva, S. L., Baldoquín, A., & Reyes, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 36-47.
- Li, L., Du, S., Wu, L., & Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena*, 78(2), 93-99.
- Lozano-Parra, J., Schnabel, S., & Ceballos-Barbancho, A. (2015). The role of vegetation covers on soil wetting processes at rainfall event scale in scattered tree woodland of Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 529, 951-961.
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M., & Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375-398.
- Mualem, Y., & Dagan, G. (1978). Hydraulic conductivity of soils: Unified approach to the statistical models. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 392-395.
- Murray Núñez, R., Orozco Benítez, M. G., Hernández Jiménez, A., Lemus Flores, C., & Nájera González, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Bio Ciencia*. (1)3, 27-35.
- Nahed-Toral, J., Valdivieso-Pérez, A., Aguilar-Jiménez, R., Cámara-Cordova, J., & Grande-Cano, D. (2013). Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: a prototype of livestock agroforestry for cleaner production. *Journal of cleaner production*, 57, 266-279.
- Nair P. K. R. 1997. Directions in tropical agroforestry research: past, present, and future. *Agroforestry Systems* 38: 223-246.

- Pinho, R. C., Miller, R. P., & Alfaia, S. S. (2012). Agroforestry and the improvement of soil fertility: a view from Amazonia. *Applied and environmental soil science*, 2012.
- Quinkenstein, A., Woellecke, J., Böhm, C., Grünewald, H., Freese, D., Schneider, B. U., & Hüttl, R. F. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental science & policy*, 12(8), 1112-1121.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Selker, J. S., McCord, J. T., & Keller, C. K. (1999). *Vadose zone processes*. CRC Press.
- Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G. J., & de Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 78(1), 39-51.
- Suárez Salazar, J. C., Rodríguez Burgos, E., & Duran Bautista, E. H. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Acta agronómica*, 64(4), 342-348.
- Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales* (Vol. 3). Icaria editorial.
- Toledo, V. M., Garrido, D., & Barrera-Basols, N. (2013). Conflictos socioambientales, resistencias ciudadanas y violencia neoliberal en México. *Ecología política*, (46), 115-124.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en recursos hidráulicos*, (11), 51-62.

Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508-513.

Young, A. (1997). *Agroforestry for soil management* (No. Ed. 2). CAB international.

3. RETENCIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO Y RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DEL SEMIDESÉRTICO

Aldo Yair Pulido Esquivel, Jorge Víctor Prado Hernández, Julio César Buendía Espinoza

Universidad Autónoma de Chapingo, km. 38.5 Carr. México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. MÉXICO.

3.1 RESUMEN

Los sistemas agroforestales en México representan una gran reserva ecológica y cultural ya que son tan diversos como la misma orografía del país. Sin embargo, estos han sido poco estudiados por diversas razones, entre ellas su amplia complejidad social, cultural, ambiental, biológica y económica. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la retención de humedad en el suelo de estos sistemas en ambientes semidesérticos, mediante parámetros hidráulicos del suelo, la materia orgánica del suelo y la cobertura de especies arbóreas. En este trabajo se evaluó la retención de humedad de dos sistemas agroforestales y un testigo, contemplando la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la humedad del suelo en distintas profundidades y ubicaciones. Los resultados demuestran que en un agroforestal denso (Ar) y un agroforestal intercalado con cultivos (AIC) son las que mayor retienen humedad en el suelo, llegando a tener humedades de hasta 70% ($cm^3 cm^{-3}$), mientras que el testigo (maíz de temporal) no retuvo tanto (hasta 50% de humedad volumétrica). Estos datos concuerdan con los análisis de suelo que muestran un mayor espesor del horizonte A en el agroforestal denso (donde se encuentra huaje y copal) de 14 cm y un contenido de materia orgánica de 2.61 % mientras que el agroforestal con cultivos intercalados tiene un espesor de 4 cm y un contenido de materia orgánica de 1.3 %. Estos datos contrastan con la parcela de testigo que no cuenta con horizonte A y tiene un contenido de materia orgánica de 1.04%.

Palabras clave: Sistema Ar, Sistema AIC, Humedad del Suelo, Cobertura Vegetal y Contenido de Materia Orgánica.

3. 2 ABSTRACT

SOIL MOISTURE RETENTION AND POTENTIAL RECHARGE TO THE AQUIFER IN AGROFORESTAL SYSTEMS OF THE SEMI-DESERT

Agroforestry systems in Mexico represent a great ecological and cultural reserve since they are as diverse as the country's orography itself. However, these have been little studied for a variety of reasons, including their broad social, cultural, environmental, biological and economic complexity. The objective of this work was to quantify soil moisture retention in these systems in semi-desert environments, using soil hydraulic parameters, soil organic matter and trees species cover. In this work, the moisture retention of 2 agroforestry systems and a control was valued, contemplating the vegetation conopy, the type of soil, and soil moisture at different depths and locations. The results show that the palo prieto (*Lysiloma divaricatum*) and copal (*Bursera graveolens*) conopy are the ones that retain the most moisture in the soil, reaching moisture levels of up to 70 ($cm^3 cm^{-3}$) while the control (temporary corn) did not retain as much (up to 50% volumetric moisture). These data agree with the soil analyzes that show a greater thickness of the A horizon in the dense agroforestry (where huaje and copal are found) of 14 cm and an organic matter of 2.61 % while the agroforestry with intercropping has a thickness of 4 cm and an organic matter content of 1.3 %. These data contrast with the control plot that does not have A horizon and has an organic matter content of 1.04 %.

Keywords: Dense agroforestry, Intercropping Agroforestry, Soil Moisture, Vegetation Conopy and Organic Matter Content.

3.3 Introducción

Para mitigar el impacto antropogénico en los ecosistemas y perpetuar la biodiversidad frente a la actual crisis climática, se ha buscado una gestión sostenible de los sistemas de producción. El uso de sistemas agroforestales es una de estas estrategias de manejo empleadas por comunidades indígenas y mestizas en diferentes hábitats de México (Moreno-Calles et al., 2014). La agroforestería mejora la estructura del suelo, mantiene la productividad mediante una gestión planificada y reduce el impacto medioambiental (Shibu, 2009).

A nivel mundial se ha estudiado el efecto que tiene la agroforestería en el agua del suelo para diferentes climas y ecosistemas, en donde se ha encontrado un efecto favorable tanto para la retención como para la infiltración de agua en el suelo (Fahad S. et al., 2022; Lenka N. K. et al., 2012; Lin, B. B. 2010). Sin embargo, la investigación sobre la retención de humedad en los sistemas agroforestales en México es un tema al que se ha prestado poca atención. Murray Núñez et al. (2011) evaluaron durante seis años la evolución de ciertas propiedades de suelos en sistemas agroforestales en el norte de Nayarit, México clasificados como fluvisoles y sistemas arbóreos, incluyendo densidad, porosidad, infiltración y capacidad de campo. Las tasas de infiltración fueron significativamente diferentes: 13.08 mm h⁻¹ milímetros por hora en el primer año y 20.03 mm h⁻¹ seis años después.

Por otro lado, el movimiento del agua en el suelo tanto temporal como espacial ha sido estudiado en México y en el mundo en su mayoría en sistemas de monocultivo. Wang et al. (2013), en China, encontraron que, bajo cubierta arbórea, mejoran la estructura, la porosidad y la retención de humedad en el suelo. En suelos franco-arcillosos, obtuvieron valores de retención de humedad de entre el 60 y el 65% bajo cubierta de *Picea crassifolia*, seguidos de entre el 45 y el 50% bajo arbustos y *Sabina przewalskii*. Niu et al. (2015), en China encontraron que, en suelos arenosos, que no tienen una alta capacidad de retención de humedad, bajo cubierta de *Calamagrostis spigejos* y *Spodiopogon sibiricus* con una cobertura del 90% retuvieron la humedad hasta un 21.65 %, frente al 9.06 % con la agricultura convencional.

En México, Prado Hernández et al. (2017) estimaron la infiltración utilizando modelos matemáticos como Green-Ampt, Brooks-Corey y Wooding en la cuenca del lago de Zirahuén, estado de Michoacán, México para conocer cómo gestionar racionalmente el recurso hídrico y evaluar la disponibilidad de agua con base en propiedades del suelo como humedad, conductividad hidráulica, tensión y eventos de precipitación. Luna Robles et al. (2020) estudiaron la infiltración en diferentes sistemas forestales en el estado de Durango, México, concluyendo que los sistemas de árboles madre y de referencia proporcionan mejores servicios hidrológicos. Estos estudios de la humedad en el suelo son de gran importancia ya que están muy ligados con el movimiento de nutrientes para las plantas (Li et al., 2020; Nevins et al., 2020; Prado-Hernández et al., 2019).

En los Estados Unidos de América, Anderson et al. (2009) descubrieron que los sistemas agroforestales retenían menos agua durante la estación seca en comparación con los cultivos en hilera, pero retenían más durante la estación lluviosa. De acuerdo con Shukla et al. (2006), el comportamiento del agua del suelo en este tipo de entorno está totalmente determinado por los cambios en las propiedades físicas y químicas tras un cambio en la cubierta vegetal. Los sistemas agroforestales transportan mayor cantidad de agua de forma subsuperficial y hacia los acuíferos que los monocultivos, aumentando así la retención de humedad en las tierras agrícolas (Sahin et al., 2016). En Guanajuato, México, se han observado muchos sistemas agroforestales, incluyendo sistemas de huamil, callejones, terrazas y keyline (linderos), pero no se cuenta con información sobre sus características hidrológicas.

Bajo este contexto, los agroecosistemas con cubierta vegetal y gestión sostenible aumentan la infiltración y la retención de humedad de los suelos, y proporcionan servicios hidrológicos en contraste con los sistemas de monocultivo convencional. Por tanto, en este estudio se compararon sistemas agroforestales durante la estación lluvias del 2022 mediante mediciones de humedad del suelo, descripciones del perfil del suelo y registros de precipitación, con el fin de evaluar la retención de

humedad del suelo, el contenido de carbono orgánico, la porosidad y la estructura del suelo, así como la recarga potencial de los acuíferos.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca Lerma-Santiago en los estados de Querétaro, Colima, Estado de México, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes, San Luis Potosí y Guanajuato, con elevaciones por arriba de los 3000 metros del nivel del mar hasta las desembocaduras de los ríos al mar y una superficie de 53, 805 km². La temperatura media anual es de 20 a 25°C, mientras que las temperaturas del mes más frío pueden descender por debajo del punto de congelación, y las temperaturas del mes más caluroso puede superar los 35 °C. La vegetación predominante es bastante heterogénea, desde bosques templados a vegetación semidesérticas, vegetación acuática y zonas agrícolas (INGEI, 2021). Los climas principales dentro de la cuenca: Árido (38.13% del área total), semiárido (40.23% del área total). En el clima semiárido, la precipitación anual oscila entre 250 y 500 mm por año. El tipo de suelo predominante son los vertisoles pélicos de textura predominantemente arcillosa, con una pendiente del terreno inferior al 2% (Figura 7). En el clima árido, las precipitaciones anuales son menores de 250 mm al año, con lluvias en verano. Suelos predominantes son leptosoles de textura limosa arcillosa (INEGI, 2021).

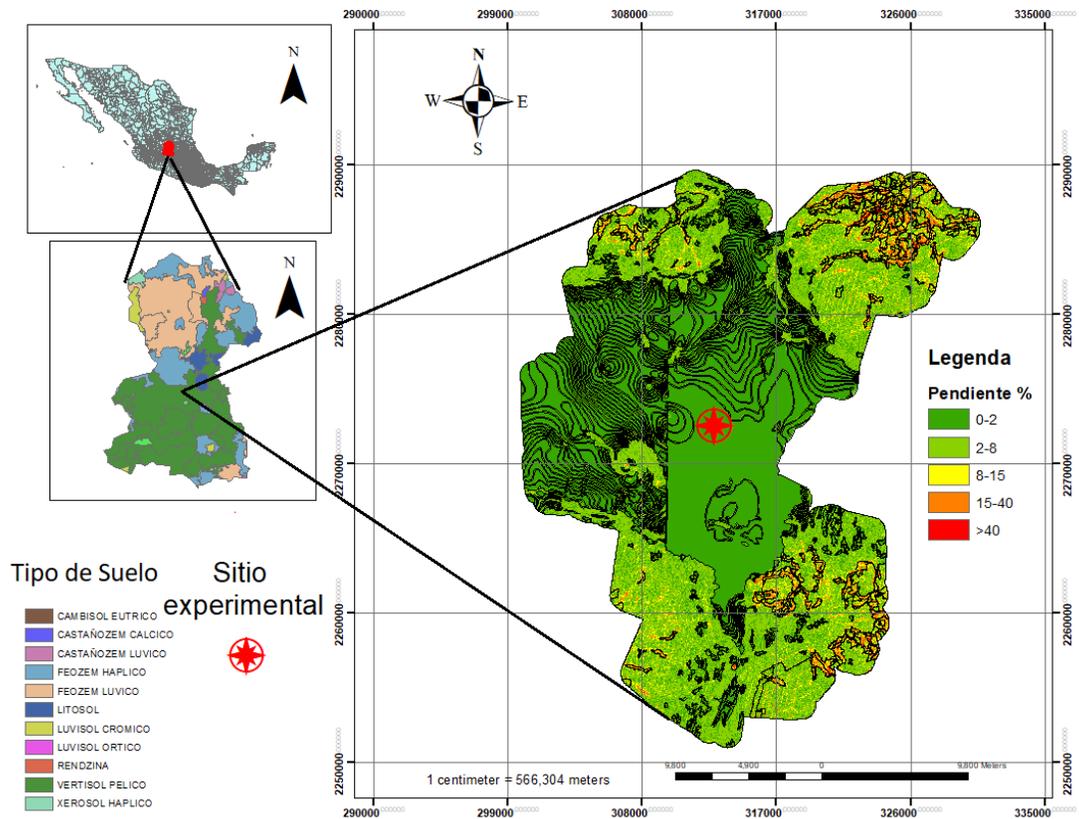


Figura 7. Área de estudio y ubicación del sitio experimental (INIFAP).

3.4.2 Sitio experimental

El sitio de estudio se estableció en el Campo Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) sede Bajío, ubicado en Celaya, Guanajuato, con una elevación de 1 767 metros y una superficie de 3 km². El área de este estudio, que forma parte de la zona climática Cwa, presenta temperaturas medias anuales de 15 a 25 °C y precipitaciones de 400 a 600 mm (García, 2004).

3.4.3 Diseño experimental

En el experimento de campo se aplicaron dos arreglos agroforestales y una parcela de maíz de temporal como testigo. Los sistemas agroforestales incluyen arboretum (Ar) y árboles intercalados con cultivos (AIC). El Arboretum tiene una disposición agroforestal densa con una variedad de especies arbóreas autóctonas adaptadas a las condiciones climáticas de la región. Los árboles están dispuestos (plantados) en

una plantación de 3 metros de ancho por 3 metros de separación y tienen aproximadamente veinte años de edad. Al mismo tiempo, también se produce forraje en la parcela, que se destina a la alimentación de ovejas. En el arreglo de árboles intercalados con cultivos, los árboles están dispuestos callejones de una separación aproximada de 5 m por 3 m y tienen una edad promedio de 20 años. La parcela de control lleva 25 años cultivando maíz de forma semimecanizada en condiciones de temporal, con aplicaciones esporádicas de riego cuando las precipitaciones no son suficientes para satisfacer las demandas de evapotranspiración. El cultivo de maíz se plantó en surcos con una distancia de 65 cm entre cada uno, a una profundidad de 0 a 25 cm (Figura 8). Durante el periodo comprendido entre el 3 de agosto y el 12 de octubre de 2022, se llevaron a cabo las mediciones en el sitio experimental.

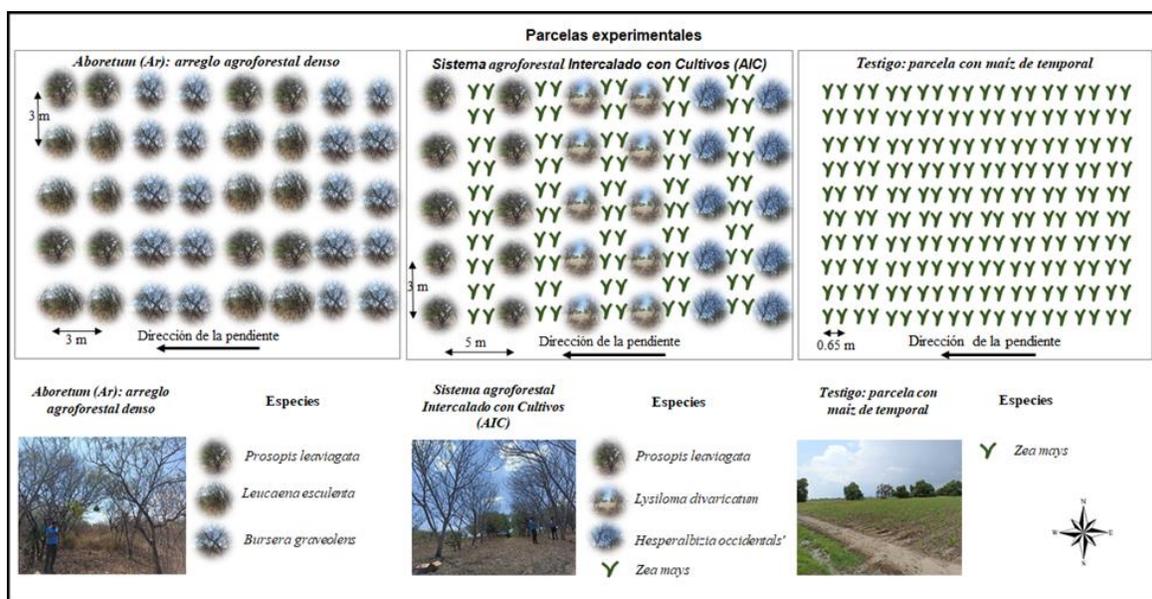


Figura 8. Sistema agroforestal denso (Ar) e intercalado con cultivos (AIC) y maíz de temporal (Testigo).

3.4.4 Especies objetivo

La selección de las especies se basó en su capacidad para prosperar en un clima semiárido y en su potencial como plantas agroforestales multipropósito.

Prosopis leaviagata, conocida como mezquite, crece en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1500 metros, desde el sur de Estados Unidos hasta Sudamérica (Bhansali, 2010). Esta especie es capaz de prosperar en climas semiáridos a

templados, es tolerante a la sequía y a las temperaturas frías, prefiere suelos francos a arenosos, aunque contengan altos niveles de pedregosidad, tolera suelos pobres y tepetrosos, requiere niveles de humedad de medios a altos y es útil para el control de la erosión (Vásquez-Méndez et al., 2011). *Bursera graveolens*, conocida como copal, crece en altitudes desde los 200 a 1500 metros sobre el nivel del mar, tiene una distribución desde México hasta el ecuador (Rzedowski, 2005). Esta especie es apreciada por su resina que tiene usos medicinales y religiosos, además de ser una especie adaptada a los climas semiáridos y cálidos (Romero-Estrada et al., 2016).

Leucaena esculenta, conocida como huaje, crece en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1000 metros sobre el nivel del mar y se distribuye principalmente en regiones tropicales y subtropicales de México y América Central. Es una especie apreciada por su alto contenido de proteína y usado generalmente como árbol forrajero, además de ser una especie muy característica de la selva baja caducifolia de México (Peralta-Júarez et al., 2017). *Lysiloma divaricatum*, conocida como palo prieto, crece desde el nivel del mar hasta los 1500 sobre el nivel del mar y tiene una distribución desde América del norte hasta la parte norte de America del sur. Es una especie apreciada principalmente por su madera y para uso forrajero, ya que su madera es duradera y su forraje tiene alto contenido nutrimental (Sánchez-Hernández et al., 2018).

Hesperalbizia occidentalis, conocida palo blanco, crece desde los 500 a los 2000 metros sobre el nivel del mar y tiene una distribución desde América del norte, más específicamente el oeste de Estados Unidos y en México. También es una especie forrajera y usada como restaurador ambiental ya que es una leguminosa que fija nitrógeno en el suelo y tiene una ornamental (Stewart and Dunsdon, 2000). *Zea mays*, conocido como maíz, crece desde el nivel de mar hasta los 3000 metros sobre el nivel del mar, es una planta nativa americana pero ahora se distribuye en todo el mundo. Es una de las plantas más importantes del mundo por su valor nutrimental e importancia biocultural (Salvador R., 2001).

3.4.5 Muestreo de la vegetación y medición de variables

El día 15 de septiembre el 2022 se midió el diámetro de la copa, la altura y la cobertura de copas de los árboles, con un flexómetro y una aplicación móvil gratuita llamada HabitApp (Landert et al., 2016). La medición se hizo en cinco árboles de cada especie dentro de la zona de goteo donde se midió la humedad del suelo, así como en cinco árboles cercanos a esta área, a la misma hora del día (12:00 h) en todos los árboles seleccionados para evitar sesgos.

3.4.6 Medición de variables edafoclimáticas

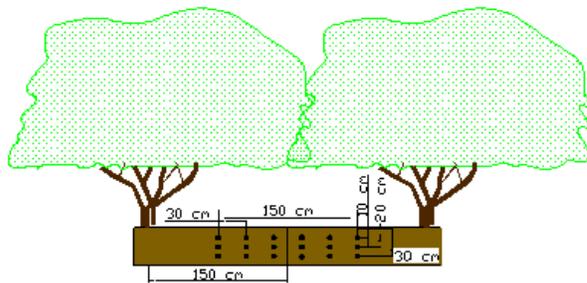
3.4.6.1 Caracterización del suelo

La caracterización del suelo de los dos sistemas agroforestales y el testigo se realizó mediante una excavación y descripción de sus perfiles. Se extrajo una muestra de suelo de cada uno de los sistemas agroforestales y el testigo, para determinar la textura con el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), la densidad aparente con el método de la probeta, la densidad real con el método del picnómetro (Blake, 2015) y el contenido de materia orgánica con el método de Walkley y Black (De Vos et al., 2007). Con el método de Walkley-Black se mide el carbono orgánico total del suelo, pero no se toma en cuenta los ácidos húmicos y fúlvicos, ni el carbono activo e inactivo capturado por las arcillas (Ladoni et al., 2010). Para evitar sesgos causados por la periferia de las parcelas, las muestras de suelo se recogieron en el centro de los sistemas de producción (She et al., 2015). En el sistema Ar, el muestreo para la determinación del contenido de carbono orgánico se realizó bajo cobertura de la especie *Leucaena esculenta*, conocida como huaje, mientras que, en el sistema AIC, el muestreo se realizó bajo la cobertura de la especie *Lysiloma divaricatum*, conocida como palo prieto.

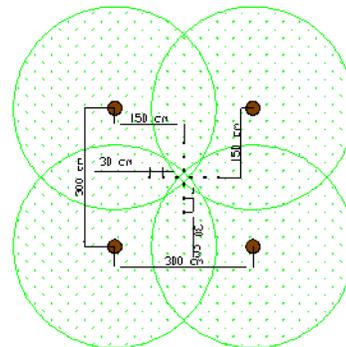
3.4.6.2 Contenido de humedad del suelo

La precipitación se monitoreó con una estación meteorológica marca Davis Vantage pro-2®, modelo 6162, ubicada a menos de dos kilómetros de los sistemas estudiados. La estación, que dispone de un balancín de vaciado cada 0.25 mm,

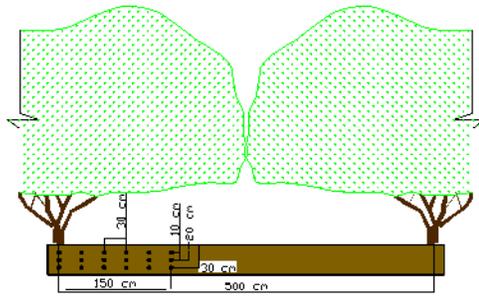
tiene una precisión del $\pm 4\%$ para intensidades de lluvia de hasta 50 mm h^{-1} y del $\pm 5\%$ para intensidades de lluvia superiores a 50 mm h^{-1} . El contenido de humedad volumétrica del suelo se midió utilizando un TDR (Time Domain Reflectometry) FIELDSCOUT 300® con una precisión del $\pm 3\%$ VWC (volumetric water content por sus siglas en inglés) en dos mallas rectangulares perpendiculares entre sí, de 150 cm de longitud y 30 cm de profundidad (Figura 3b y 3d). En cada malla hay 18 puntos de medición, dispuestos en tres filas y seis columnas, separadas por 10 cm y 30 cm, respectivamente. Como la mayor parte del agua y los nutrientes son absorbidos por las plantas a profundidades de 10, 20 y 30 cm (Hombegowda et al., 2020), se midió la humedad a estas profundidades. La variable de respuesta es la profundidad del suelo, la cubierta arbórea y la fecha de medición, con 12 repeticiones de humedad por profundidad del suelo. Para evaluar cómo influye la cubierta vegetal en el comportamiento de la humedad del suelo, se realizaron las mediciones de la precipitación bajo el dosel de los árboles de las especies de estudio (tres especies por sistema agroforestal). En el sistema Ar, se hicieron bajo cuatro árboles adyacentes de cada especie (Figura 9a), mientras que, en el sistema AIC, se hicieron bajo dos árboles adyacentes de cada especie (Figura 9c). En el sistema testigo, se utilizaron dos mallas rectangulares de las mismas dimensiones en el centro de la parcela para medir los niveles de humedad. Durante la época de lluvias (verano), se realizaron las mediciones de la precipitación en cinco fechas: 3 de agosto, 17 de agosto, 15 de septiembre, 27 de septiembre y 12 de octubre de 2022, designadas como fechas 1, 2, 3, 4 y 5.



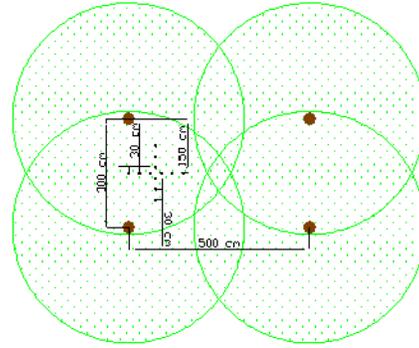
a) Sistema Ar, in situ, vista horizontal



b) Sistema Ar, in situ, superior



c) Sistema AIC, in situ, vista horizontal



d) Sistema AIC, in situ, vista superior

Figura 9. Medición de la Humedad en los sistemas agroforestales.

3.4.6.2 Uniformidad de distribución de la humedad en el suelo

Se calculó el coeficiente de uniformidad de Christiansen para cuantificar la uniformidad de la humedad del suelo en los sistemas agroforestales y el sistema testigo:

$$CU_C = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta|}{n\theta} \right] \times 100 \quad (1)$$

donde CU_C es el coeficiente de uniformidad de Christensen, θ es la humedad del suelo promedio y θ_i la humedad promedio del i -ésimo sitio de medición (Barragan et al., 2006).

3.4.6.3 Lámina de recarga potencial de acuíferos

La lámina de recarga potencial al acuífero se calculó con la siguiente ecuación:

$$LRPA = (\theta_{obs} - \theta_{cc}) \times 1cm \mid \theta_{obs} \geq \theta_{cc} \quad (2)$$

donde $LRPA$ es la lámina de recarga potencial al acuífero (cm), θ_{obs} es la humedad del suelo (promedio) observada, y θ_{cc} es la humedad del suelo a capacidad de campo. En donde θ_{obs} se obtuvo promediando la humedad del suelo bajo cada cobertura y θ_{cc} se obtuvo a partir de la textura y el contenido de materia orgánica (Saxton y Rawls, 2006).

3.4.7 Análisis Estadístico

Se evaluó el contenido de humedad del suelo a tres profundidades de 10 a 12 centímetros, de 12 a 20 centímetros y de 20 a 30 centímetros en siete coberturas vegetales y del suelo para cinco fechas diferentes utilizando el promedio de las 12 réplicas en cada profundidad y cobertura. Para identificar diferencias estadísticamente significativas entre la profundidad del suelo y la cubierta vegetal y del suelo, a través de la variable de respuesta Contenido de Humedad del Suelo se utilizó un Diseño Completamente Aleatorizado con Arreglo Combinatorio Bifactorial Asimétrico y una Comparación múltiple de Tukey con $p - \text{valor} < 0.05$. El Factor 1 fue la profundidad del suelo con 3 niveles de profundidad 10, 20 y 30 cm y el Factor 2 fue la cobertura vegetal y del suelo con 7 niveles de coberturas. Los cálculos se realizaron utilizando el programa Minitab (Minitab LLC, 2020).

4.5 Resultados y Análisis

4.5.1 Muestreo de la vegetación y medición de variables

En el Cuadro 2 se muestran los promedios y las desviaciones típicas de las variables altura, diámetro de copa y cobertura vegetal de las diferentes especies. El palo blanco (*Hesperalbizia occidentalis*) del sistema AIC fue el árbol más alto, mientras que el copal (*Bursera graveolens*) del sistema Ar fue el más bajo; sin embargo, el copal presentó la segunda cobertura arbórea más alta después del huaje (*Leucaena esculenta*) del sistema Ar. En general, los resultados obtenidos de altura, diámetro de copa y cobertura vegetal están dentro del rango de especies de este tipo (Breceda et al., 2005; Mashiri et al., 2008; Mohanty et al., 2012).

Cuadro 2. Promedios y desviaciones estándar de las variables dasométricas de las especies de estudio.

Especie	Altura (m)	Diámetro de copa (m)	Cobertura (%)
---------	------------	-------------------------	---------------

Mezquite Ar	5.00 ± 1.00	5.23 ± 0.72	62.40 ± 5.87
Copal Ar	4.34 ± 0.50	4.04 ± 1.68	73.80 ± 4.12
Huaje Ar	3.90 ± 0.65	3.83 ± 1.21	75.20 ± 3.84
Mezquite AIC	4.30 ± 0.44	5.70 ± 0.58	58.05 ± 3.69
Palo prieto AIC	4.70 ± 1.15	6.25 ± 1.04	71.05 ± 8.22
Palo blanco AIC	6.00 ± 0.61	7.51 ± 1.06	71.65 ± 10.77

3.5.2 Medición de variables edafoclimáticas

3.5.2.1 Caracterización del suelo

En la Figura 10, se pueden observar los perfiles de suelo de los tres sistemas de producción, en los que se aprecian los efectos generados por su manejo. En los suelos de los sistemas agroforestales se observa una mejor estructura de los agregados del suelo, presentando agregados angulares en el horizonte A y agregados columnares en el horizonte B, en contraste con la estructura agrietada del suelo testigo (Porta Casanellas et al., 2003). De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Saxton & Rawls, 2006), la textura del suelo en los horizontes A y B de los tres sistemas de producción estudiados fue arcillosa, conteniendo hasta un 70.55% de partículas de arcilla. Esto coincide con González et al. (2010), quienes clasificaron los suelos de esta región (Bajío guanajuatense) como vertisoles.

De acuerdo con los datos de porosidad del horizonte A, los suelos del sistema Ar, AIC y testigo presentaron una porosidad de 33.23%, 32.68% y 28.9%, respectivamente; mientras que para el horizonte B, los suelos del sistema Ar, AIC y testigo presentaron una porosidad de 30.80%, 32.01% y 30.01%, respectivamente. El contenido de carbono en los suelos del sistema Ar, AIC y testigo fue de 2.61 %, 1.30 % y 1.04 %, respectivamente, mientras que el contenido de carbono en el horizonte B fue de 0.52 %, 0.78% y 0.26 %, respectivamente. Los sistemas Ar (31.52 %) y AIC (32.52 %) presentaron mayor porosidad del suelo y niveles más altos de carbono orgánico en el suelo en ambos horizontes que el sistema testigo (29.46 %), lo que indica que mejoran la estructura del suelo debido a que su

cobertura vegetal se incorpora continuamente al suelo, creando materia orgánica y manteniendo así la biodiversidad y la porosidad. La descomposición de la materia orgánica en el suelo crea canales y agregados angulares principalmente a lo largo del horizonte A que mejoran la porosidad del suelo (Bottinelli et al., 2015; Brady & Weil, 1999). En los tres sistemas de producción, el contenido de carbono orgánico fue mayor en el horizonte superficial, lo que puede explicarse por la constante adición de materia orgánica a la parte superior del suelo por parte de la cobertura vegetal (Khaleel et al., 2020; Barbosa-Briones et al., 2019) aunque la incorporación de materia orgánica puede diferir dependiendo de las especies arbóreas de los sistemas (Korkanç, 2014). El contenido de materia orgánica mejora la porosidad del suelo por la actividad de la fauna del suelo y esto se ve reflejado en el contenido de la humedad del suelo (Shukla et al., 2006).

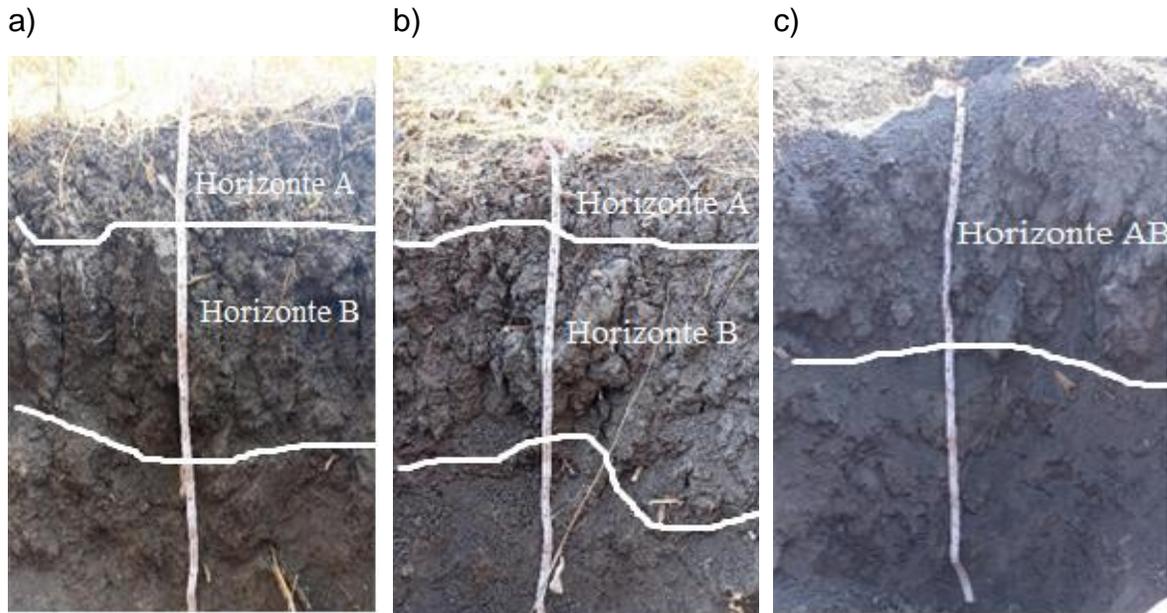


Figura 10. Perfiles de los suelos de los sistemas estudiados: a) Sistema Ar, b) Sistema AIC, c) Testigo

En el Cuadro 3, se reportan los contenidos de humedad a saturación (θ_s), a capacidad de campo (θ_{cc}) y a punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), la densidad aparente (D_a) y la conductividad hidráulica saturada (K_s), según los valores sugeridos por Saxton y Rawls (2006). Los parámetros hidráulicos del suelo para los tres sistemas estudiados son bastante homogéneos, ya que pertenecen a la misma clase textural, a excepción de la K_s del horizonte A del Testigo, que es ligeramente mayor a la de los demás sistemas.

Cuadro 3. Parámetros hídricos de los horizontes de los sistemas seleccionados.

Horizonte	Parámetro	Sistema		
		Ar	AIC	Testigo
A	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.539	0.536	0.553
	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.453	0.453	0.449

	$\theta_{pmp}(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	0.347	0.348	0.345
	$D_a(\text{g cm}^{-3})$	1.220	1.230	1.190
	$K_s(\text{mm h}^{-1})$	1.460	1.320	2.490
	$\theta_s(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	0.462	0.529	0.518
	$\theta_{cc}(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	0.388	0.455	0.458
B	$\theta_{pmp}(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	0.269	0.349	0.350
	$D_a(\text{g cm}^{-3})$	1.430	1.250	1.280
	$K_s(\text{mm h}^{-1})$	0.990	0.960	0.510

3.5.2.2 Contenido de humedad del suelo

En la Figura 11, se muestra el comportamiento de la humedad en las diferentes coberturas vegetales para los dos sistemas agroforestales y el sistema testigo durante la temporada de lluvias del 3 de agosto al 12 de octubre de 2022. La cubierta de copal presentó el mayor contenido de humedad en el suelo en el sistema Ar, seguido del palo blanco en el sistema AIC, del mezquite en el sistema AIC, del huaje en el sistema Ar, del mezquite en el sistema Ar, del palo prieto en el sistema AIC, y finalmente la cobertura del maíz en el sistema de control.

El contenido de humedad del suelo bajo la cubierta de copal Ar fue mayor que bajo la cubierta de mezquite Ar debido a que la cubierta de copal Ar es la segunda más densa después de la cubierta de huaje Ar y los árboles son bajos, reduciendo la evapotranspiración y la pérdida de humedad (Bhark & Small, 2003). En contraste, el contenido de humedad bajo la cubierta de mezquite Ar fue el más bajo de todas las cubiertas, en gran parte debido a que su cubierta es más baja, permitiendo el paso de más radiación solar, dando como resultado una mayor evapotranspiración y una mayor pérdida de humedad del suelo (Bosi et al., 2020). En el sistema AIC, al ser más abierto y tener mayor exposición al sol, el contenido de humedad fue menor en comparación con el sistema más denso, en el que se retiene más humedad, pudiendo ser ventajoso o desventajoso en función de la aplicación que se pretenda dar al sistema (Chamizo et al., 2013; Ni et al., 2019).

En general, los valores promedio del contenido de humedad del suelo fueron inferiores a la capacidad de campo (θ_{cc} , Cuadro 2) en las fechas de medición, sin embargo, los niveles de humedad superaron los niveles de saturación durante el evento de lluvia más grande e intenso ocurrido el 17 de agosto, lo cual puede ser atribuido al alto contenido de arcilla en el suelo y sus propiedades físicas que generan una mayor retención de agua (Porta Casanellas et al., 2003), así como a los beneficios derivados de la incorporación de materia orgánica proveniente de la cobertura vegetal.

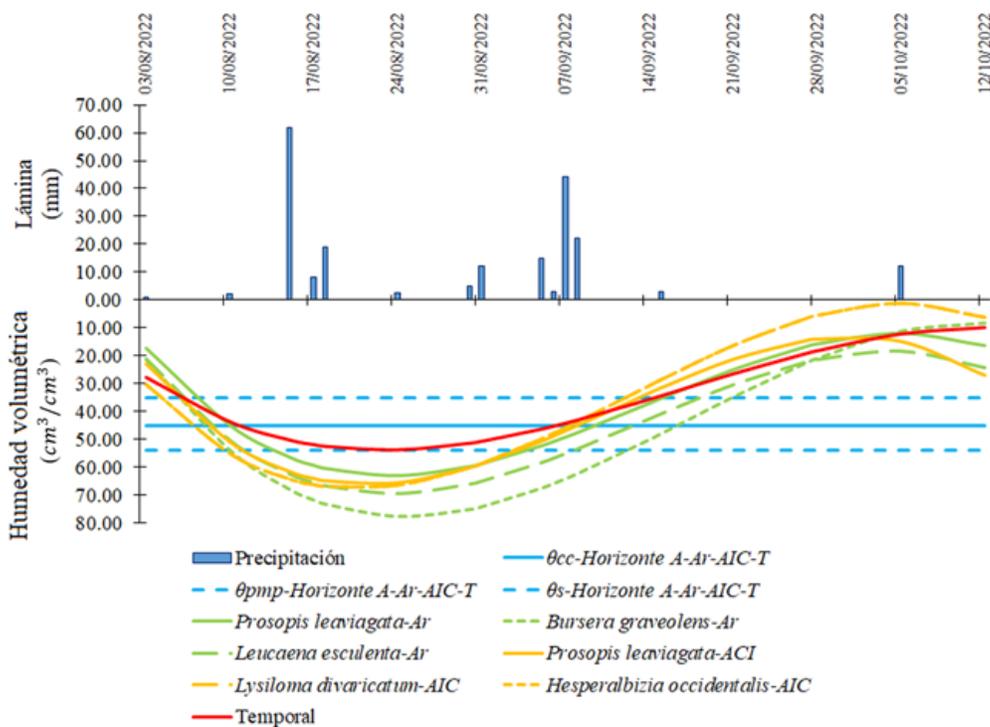


Figura 11. Comportamiento del contenido de humedad promedio en el suelo con las especies arbóreas analizadas y el testigo.

3.5.2.3 Uniformidad de distribución de la humedad en el suelo

En la Figura 12 se representa la uniformidad media de la distribución de la humedad del suelo para todas las cubiertas vegetales en los tres sistemas de producción entre el 3 de agosto de 2022 y el 12 de octubre de 2022, existe una diferencia significativa en la uniformidad de distribución de la humedad en el suelo para los 3 sistemas

estudiados (p – valor < 0.05), con un valor de Tukey de 4.84 de los cuales se desprenden 3 grupos de medias. Entre el sistema Ar, el copal presentó la mayor uniformidad de distribución de la humedad del suelo (79.56%), seguido por el Mezquite (76.97%) y el Huaje (74.60%), lo cual corresponde con lo obtenido en los resultados de cobertura vegetal, el Copal al ser una especie con un tamaño de hoja mayor a las demás especies del sistema Ar tiene un mayor amortiguamiento de la humedad del suelo (Romero-Estrada et al., 2016). En el sistema AIC, el palo prieto presentó la mayor uniformidad de distribución del suelo con 81.99 %, seguido del Mezquite con 72.75 % y del palo blanco con 74.29 %, datos que corresponden con los resultados de cobertura vegetal y la morfología de las especies objetivo (Bhansali, 2010; Sánchez-Hernández et al., 2018). En el sistema testigo, la uniformidad de distribución fue del 77.08 %. En general, la uniformidad media de distribución de la humedad en el suelo fue similar en los tres sistemas de producción con aproximadamente 76.77 % y una desviación estándar de 0.38 %.

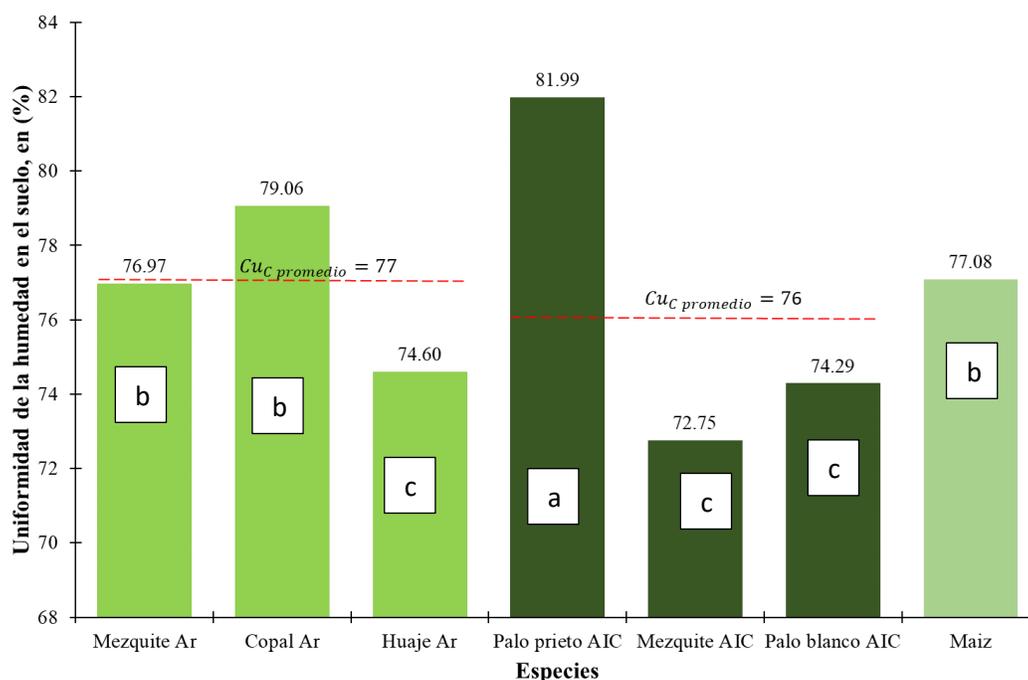


Figura 12. Uniformidad de distribución promedio de la humedad del suelo en cada uno de los tres sistemas de producción, durante el periodo comprendido entre el 3 de agosto de 2022 y el 12 de octubre de 2022. Medias de Tukey de mayor a menor a, b, c.

3.5.3 Recarga potencial al acuífero

Existe una diferencia significativa para la recarga potencial en las fechas de mayor precipitación que fueron el 15 de agosto de 2022 y el 7 de septiembre de 2022 (p – valor < 0.05), con un valor de Tukey de 7.94 de los cuales se desprenden 2 grupos de medias. La mayor recarga potencial de agua al acuífero se presentó en la cobertura de copal (25.98 cm/cm), seguida de la cobertura de huaje (19.77 cm/cm) y la cobertura de mezquite (14.06 cm/cm), en el sistema Ar. En el sistema AIC, la mayor recarga potencial de agua al acuífero se presentó en la cobertura de palo prieto y palo blanco (con 23.88 y 23.47 cm/cm, respectivamente), seguida de la cobertura del Mezquite (21.45 cm/cm). La menor recarga ocurrió en la parcela testigo que no tiene cobertura arbórea. En general, el sistema AIC, alcanzó la mayor recarga promedio potencial hacia el acuífero con 22.93 cm/cm, seguido del sistema Ar con 19.93 cm/cm, y del sistema testigo con 9.64 cm/cm (Cuadro 4).

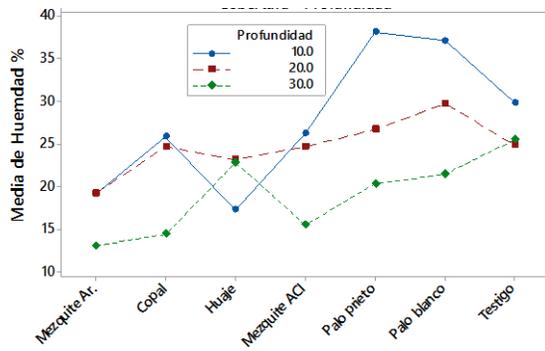
Cuadro 4. Recarga potencial al acuífero de los suelos de los sistemas estudiados. Medias de Tukey de mayor a menor a, b.

Cobertura	Recarga (cm/cm)	
	15/08/22	7/09/22
Mezquite Ar. b	14.06	0.00
Copal Ar. a	25.98	6.03
Huaje Ar. a	19.77	0.00
Mezquite AIC a	21.45	0.00
Palo prieto AIC a	23.88	0.00
Palo blanco AIC a	23.47	0.00
Testigo b	9.64	0.00

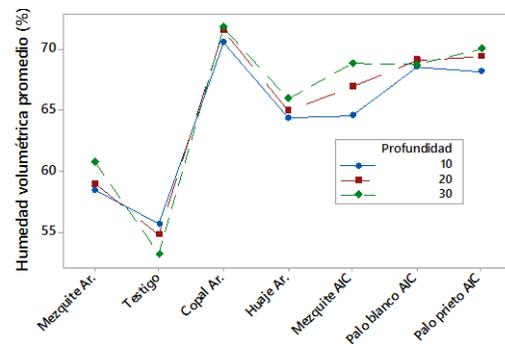
3.5.3.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico indicó que no existen una dependencia entre los factores principales profundidad del suelo y cobertura vegetal que explique el contenido de humedad del suelo, para todas las fechas de medición. El contenido de humedad fue diferente tanto en las tres profundidades, así como en las 7 coberturas de

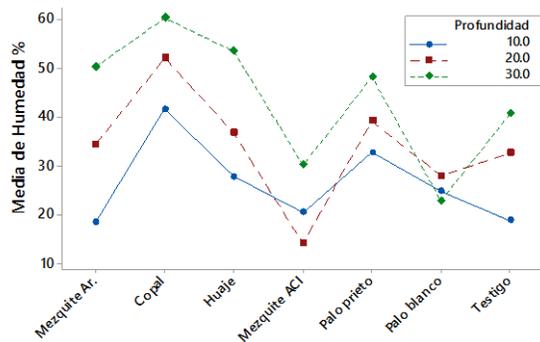
vegetación y suelo evaluadas (p – valor < 0.05). Para la primera fecha, el mayor contenido de humedad fue bajo la cobertura de Palo prieto y Palo blanco del Sistema AIC y la profundidad del suelo a 10 cm para todos los sistemas estudiados, posiblemente por algún evento de precipitación que ocurrió antes de la recolección de datos (Figura 13a). Para la segunda fecha, el mayor contenido de humedad en la cobertura de Copal en el Sistema Ar, mientras que no hubo diferencias en los tres niveles de profundidad de suelo (Figura 13b). Esto se debe a que el contenido de humedad del suelo se homogeniza en todo el perfil del suelo después de un evento de lluvia (Porta Casanellas et al., 2003). Para la tercera fecha, la mayor retención de humedad se alcanzó bajo la cobertura del Sistema Ar (Figura 13c), ya que el arreglo agroforestal es más denso y evita una mayor evapotranspiración que la que puede ocurrir en el Sistema AIC y el Sistema Tradicional Testigo (Stan et al., 2014). Para la cuarta fecha, la mayor retención de humedad se alcanzó bajo las coberturas de Copal y Palo prieto en el Sistema Agroforestal AIC y Ar, respectivamente, y la profundidad del suelo a 30 cm (Figura 13d). Para la quinta y última fecha, el mayor contenido de humedad en el suelo se alcanzó bajo la cobertura del Copal y Palo prieto en el Sistema Agroforestal AIC y Ar respectivamente y la profundidad a 30 cm. Esto se debe a que semanas después al evento de precipitación el agua se mueve a mayores profundidades (Xu et al., 2012).



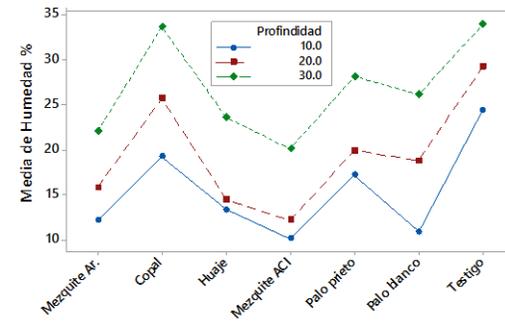
a) Fecha 1



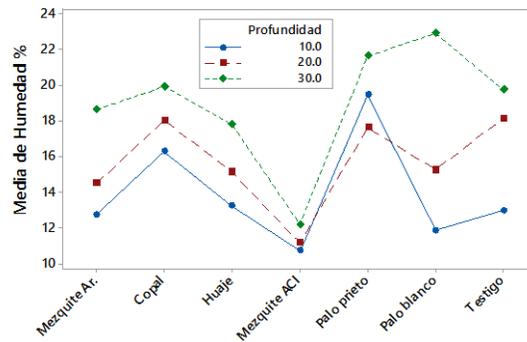
b) Fecha 2



c) Fecha 3



d) Fecha 4



e) Fecha 5

Figura 13. Interacción de la humedad en el suelo entre la cobertura vegetal y la profundidad del suelo.

3.6 Conclusiones

Existe un efecto positivo en la retención de humedad en el suelo con sistemas agroforestales respecto a el de uno con monocultivo. También existe un efecto

positivo en el contenido de materia orgánica y porosidad en los sistemas agroforestales respecto al el suelo con monocultivo. Particularmente hay mayor humedad en el suelo bajo Copal y Palo prieto para todas las fechas. Hay mayor contenido de materia orgánica en el Sistema Ar, seguido del Sistema AIC y el testigo, de la misma manera con la porosidad. También existe un efecto positivo para el área foliar respecto la retención de humedad en el suelo, entre mayor cobertura vegetal, mayor retención de humedad en el suelo.

3.7 Literatura citada

- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5–16.
- Barbosa-Briones, E., Cardona-Benavides, A., Reyes-Hernández, H., & Muñoz-Robles, C. (2019). Ecohydrological function of vegetation patches in semi-arid shrublands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 168, 36–45.
- Benavides Meza, H. M., & Fernández Grandizo, D. Y. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques*, 18(2), 51–71.
- Bhansali, R. R. (2010). Biology and multiplication of *Prosopis* species grown in the Thar Desert. *Desert Plants: Biology and Biotechnology*, 371-406.
- Bhark, E. W., & Small, E. E. (2003). Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan desert, New Mexico. *Ecosystems*, 6(2), 185–196.
- Blake, G. R. (2015). Bulk Density. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 374–390.
- Bosi, C., Pezzopane, J. R. M., & Sentelhas, P. C. (2020). Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. *Agroforestry Systems*, 94(2), 429–440.

- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, 146(PA), 118–124.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils¹. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). The Nature properties of soils, and Pearson and Prentice Hall, USA. *New Jersey*.
- Breceda, A., Ortiz, V., & Scrosati, R. (2005). Mauto (*Lysiloma divaricatum*, Fabaceae) Allometry as an Indicator of Cattle Grazing Pressure in a Tropical Dry Forest in Northwestern Mexico. *Rangeland Ecology & Management*, 58(1), 85–88.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., & Domingo, F. (2013). The role of biological soil crusts in soil moisture dynamics in two semiarid ecosystems with contrasting soil textures. *Journal of Hydrology*, 489, 74–84.
- De Vos, B., Lettens, S., Muys, B., & Deckers, J. A. (2007). Walkley–Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*, 23(3), 221–229.
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., ... & Poczai, P. (2022). Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. *Sustainability*, 14(22), 14877.
- García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.
- González, J. M., Ventura, E., Castellanos, J. Z., & Brevik, E. C. (2010). *Soil Science in Mexico: History Challenges and the Future*.
- Hernández, J., Ramírez, F., Acevedo D., García, M., Saucedo, F., & Ruíz, A. (2017). Evaluation of Green-Ampt infiltration equation in some agricultural soils in Mexico, using USDA information and a modified method from Brooks and Corey. *Interciencia*, 42(9), 563–569.

- Hombegowda, H. C., Köhler, M., Röhl, A., & Hölscher, D. (2020). Tree species and size influence soil water partitioning in coffee agroforestry. *Agroforestry Systems*, 94(1), 137–149.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2021). Tipo y uso de Suelos, Resultados preliminares. México: INEGI.
- Khaleel, A. A., Sauer, T. J., & Tyndall, J. C. (2020). Changes in deep soil organic carbon and soil properties beneath tree windbreak plantings in the U.S. Great Plains. *Agroforestry Systems*, 94(2), 565–581.
- Korkanç, S. Y. (2014). Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties. *CATENA*, 123, 62–69.
- Ladoni, M., Bahrami, H. A., Alavipanah, S. K., & Norouzi, A. A. (2010). Estimating soil organic carbon from soil reflectance: A review. *Precision Agriculture*, 11(1), 82–99.
- Lenka, N. K., Choudhury, P. R., Sudhishri, S., Dass, A., & Patnaik, U. S. (2012). Soil aggregation, carbon build up and root zone soil moisture in degraded sloping lands under selected agroforestry based rehabilitation systems in eastern India. *Agriculture, ecosystems & environment*, 150, 54-62.
- Li, R., Li, Q., Zhang, J., Liu, Z., Pan, L., Huang, K., & Zhang, L. (2020). Effects of organic mulch on soil moisture and nutrients in karst area of Southwest China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(6), 4161–4174.
- Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and forest meteorology*, 150(4), 510-518.
- Luna Robles E., Cantú Silva I., Yáñez Díaz M. I., González Rodríguez H., Marmolejo Monsiváis J. G., & Béjar Pulido S. J. (2020). Ajuste de modelos empíricos de infiltración en un Umbrisol bajo diferentes tratamientos silvícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57), 132–152.

- Mashiri, F. E., McClaran, M. P., & Fehmi, J. S. (2008). Short- and Long-Term Vegetation Change Related to Grazing Systems, Precipitation, and Mesquite Cover. *Rangeland Ecology & Management*, 61(4), 368–379.
- Minitab, I. (2020). *MINITAB*. Retrieved from <http://www.minitab.com/en-US/products/minitab/>
- Mohanty, M., Kumar Sinha, N., & Chaudhary, R. (2012). *Stability of Soil Aggregates under Different Vegetation Covers in a Vertisol of Central India*.
- Moreno-Calles, A. I., Galicia-Luna, V. J., Casas, A., Toledo, V. M., Ramos, M. V.-, Santos-Fita, D., & Camou-Guerrero, A. (2014). Etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *ETNOBIOLOGÍA*, 12(3), 1–16.
- Murray Núñez, R., Bojórquez Serrano J. I., Hernández Jiménez A., Orozco Benítez M. G., García Paredes J. D., Gómez Aguilar J. R., Ontiveros Guerra H., Aguirre Ortega J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Bio Ciencias*. 1(3), 27-35.
- Nevins, C. J., Strauss, S. L., & Inglett, P. W. (2020). Biological soil crusts enhance moisture and nutrients in the upper rooting zone of sandy soil agroecosystems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(5), 615–626.
- Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Ng, C. W. W., & Garg, A. (2019). Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling. *Journal of Hydrology*, 571, 494–502.
- Niu, C. Y., Musa, A., & Liu, Y. (2015). Analysis of soil moisture condition under different land uses in the arid region of Horqin sandy land, northern China. *Solid Earth*, 6(4), 1157–1167.
- Peralta-Juárez, I., Gómez-Campos, A., Romero-Castillo, P. A., & Reyes-Dorantes, A. (2017). Anthropocentric use of the guaje leucaena esculenta (Moc. & Sessé

- Ex. Dc.) Benth, in two communities in the mixteca baja region of Oaxaca, Mexico. *Polibotánica*, (43), 349-364.
- Porta Casanellas, J., Reguerín, L. A., de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*.
- Prado-Hernández, J. V., Pineda-Pineda, J., Martínez-Ruiz, A., Carrillo-García, M., & Aparicio-Parra, J. J. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*) crop production using drip irrigation installed at different depths. *Acta Horticulturae*, 1253, 183–190.
- Rao, M. R., Nair, P. K. R., & Ong, C. K. (1997). Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38(1–3), 3–50.
- Romero-Estrada, A., Maldonado-Magaña, A., González-Christen, J., Bahena, S. M., Garduño-Ramírez, M. L., Rodríguez-López, V., & Alvarez, L. (2016). Anti-inflammatory and antioxidative effects of six pentacyclic triterpenes isolated from the Mexican copal resin of *Bursera copallifera*. *BMC complementary and alternative medicine*, 16(1), 1-10.
- Rzedowski, J., Lemos, R. M., & de Rzedowski, G. C. (2005). Inventario del conocimiento taxonómico, así como de la diversidad y del endemismo regionales de las especies mexicanas de *Bursera* (Burseraceae). *Acta Botanica Mexicana*, (70), 85-111.
- Sahin, H., Anderson, S. H., & Udawatta, R. P. (2016). Water infiltration and soil water content in claypan soils influenced by agroforestry and grass buffers compared to row crop management. *Agroforestry Systems*, 90(5), 839–860.
- Salvador, R. (2001). Maíz. *Publicaciones del Programa Nacional de Etnobotánica. México. Universidad Autónoma Chapingo*.
- Sánchez Hernández, M. Á., Fierros González, A. M., Velázquez Martínez, A., Santos Posadas, H. M. D. L., Aldrete, A., & Cortés Díaz, E. (2018). Estructura, riqueza y diversidad de especies de árboles en un bosque tropical caducifolio de Morelos. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 131-156.

- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578.
- She, D., Zhang, W., Hopmans, J. W., & Timm, L. C. (2015). Area representative soil water content estimations from limited measurements at time-stable locations or depths. *Journal of Hydrology*, 530, 580–590.
- Shukla, M. K., Lal, R., Ebinger, M., & Meyer, C. (2006). Physical and chemical properties of soils under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 66(4), 673–685.
- Stewart, J. L., & Dunsdon, A. J. (2000). The potential of some neotropical *Albizia* species and close relatives as fodder resources. *Agroforestry Systems*, 49, 17-30.
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E., Oleschko, K., Hernández-Sandoval, L., & Domínguez-Cortázar, M. A. (2011). Soil erosion processes in semiarid areas: the importance of native vegetation. *INTECH Open Access Publisher*, 1, 25-41.
- Wang, C., Zhao, C. Y., Xu, Z. L., Wang, Y., & Peng, H. H. (2013). Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment. *Journal of Arid Land*, 5(2), 207–219.
- Yang, T., Ala, M., Zhang, Y., Wu, J., Wang, A., & Guan, D. (2018). Characteristics of soil moisture under different vegetation coverage in Horqin Sandy Land, northern China. *PLoS ONE*, 13(6).
- Xu, Q., Liu, S., Wan, X., Jiang, C., Song, X., & Wang, J. (2012). Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 26(25), 3800-3809.

4. MODELACIÓN DINÁMICA DEL AGUA EN SUELOS AGROFORESTALES DEL BAJÍO DE MÉXICO CON HYDRUS 2D

Aldo Yair Pulido Esquivel, Jorge Víctor Prado Hernández, Julio César Buendía Espinoza

Universidad Autónoma de Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. MÉXICO.

4.1 RESUMEN

Los sistemas agroforestales en México representan una gran reserva ecológica y cultural ya que son tan diversos como la misma orografía del país. Dentro los sistemas agroforestales de México los menos estudiados han sido los establecidos en ambientes semidesértico y del norte del país. El objetivo de este trabajo fue modelar la dinámica del agua en el suelo de estos sistemas en ambientes semidesérticos, más específicamente en el Bajío guanajuatense, por su vulnerabilidad hídrica. Dicha modelación se realizó en Hydrus 2D para obtener curvas de humedad e inferir láminas de infiltración a partir de datos experimentales y datos de precipitación del 3 de agosto de 2022 a el 12 de octubre del 2022 en 2 sistemas agroforestales con diferente arreglo y diferentes especies arbóreas de interés agroforestal. Bajo la cobertura de palo prieto AIC (*Lysiloma divaricatum*) y copal Ar (*Bursera graveolens*) es donde hay mayor dinámica del agua en el suelo, donde mayor retención hubo y mayor lámina infiltrada que puede ser inferida a través de Hydrus 2D, en contraste con el testigo y la cobertura de mezquite (*Prosopis leaviagata*).

Palabras clave: Sistema Ar, Sistema AIC, contenido de humedad, lámina infiltrada.

4.2 ABSTRACT

DYNAMIC MODEL OF WATER IN AGROFOREST SOILS OF THE BAJIO MEXICO WITH 2D HYDRUS

Agroforestry systems in Mexico represent a great ecological and cultural reserve since they are as diverse as the country's orography itself. Within the agroforestry systems of Mexico, the least studied have been those established in semi-desert environments and in the north of the country. The objective of this work was to model the dynamics of water in the soil of these systems in semi-desert environments, more specifically in the Guanajuato Bajío, due to its water vulnerability. This modeling was carried out in Hydrus 2D to obtain humidity curves and infer infiltration sheets from experimental data and precipitation data from August 3, 2022, to October 12, 2022, in 2 agroforestry systems with different arrangements and different tree species. of agroforestry interest. Under the cover of palo prieto AIC (*Lysiloma divaricatum*) and copal Ar (*Bursera graveolens*) is where there is greater water dynamics in the soil, where there was greater retention and greater infiltrated sheet that can be inferred through 2D Hydrus, in contrast to the witness and the mesquite hedge (*Prosopis leaviagata*).

Keywords: Ar System, AIC System, moisture content, infiltrated sheet.

4.3 Introducción

Los sistemas agroforestales son sistemas productivos cuya función es integrar árboles forestales con cultivos agrícolas y/o ganaderos en una única unidad productiva, dentro de un marco temporal y espacial determinado, con el fin de maximizar la producción de forma sostenible (Wallace et al., 2005; Fassbender, 1987; Schroth y Sinclair, 2003), comparable a los rendimientos que generalmente se obtienen mediante el monocultivo utilizando los mismos recursos (Rhoades C. 1996). Los sistemas agroforestales han sido considerados beneficiosos tanto al medio ambiente como al sistema productivo, especialmente en términos de nutrientes y eficiencia hídrica, mediante la producción de hojarasca, que mejora la estructura del suelo y aporta nutrientes al suelo. Los sistemas agroforestales conservan y protegen el suelo debido a la capacidad de mantener una buena y abundante cubierta de hojarasca que reduce el efecto erosivo de las gotas de lluvia y proporciona estructura al suelo. Los sistemas agroforestales desarrollan una dinámica hídrica muy eficaz porque la cubierta vegetal redistribuye las precipitaciones, amortiguando así los efectos de las gotas de lluvia, permitiendo que lleguen al suelo con menos energía y se infiltren más fácilmente (Anderson et al., 2009; Nevins et al., 2020; Pérez-Nieto et al., 2005; Wallace et al. 2005; Fassbender, 1987; Giraldo y Jaramillo, 2004; Schroth et al. 2001).

A nivel mundial se ha estudiado el efecto de la dinámica del agua en sistemas agroforestales, en donde se ha notado que los sistemas agroforestales por su cobertura arbórea tienen un efecto positivo tanto para una mejor dinámica del agua en el suelo como una mayor lámina infiltrada (Hasselquist N.J., et al. 2018; Jackson N.A., et al. 1999; Livesley S. J., et al. 2004). Sin embargo, en México poco se ha estudiado la dinámica del agua en el suelo bajo manejo agroforestal, y mucho menos sobre su representación matemática. Existen algunos estudios realizados sobre sistemas agroforestales en suelos fluvisoles y arbóreos, en los que se ha evaluado la densidad, la porosidad, la infiltración y la capacidad de campo (Muñoz-Villers, L. E et al. 2020; Murray-Núñez et al, 2011).

La dinámica del agua del suelo es de gran importancia a causa de la crisis mundial por la disminución de la disponibilidad de agua, sobre todo en las regiones

semiáridas y áridas (Ureta et al., 2020), y la creciente demanda de este valioso recurso (Ponce-Rodríguez et al., 2021; Wang et al., 2013; Zhu et al., 2019). El movimiento del agua en el suelo es importante para determinar la capacidad hídrica de los cultivos (Carnero y Carnero, 2018), la capacidad de recarga de los acuíferos (Aguilar-García y Ortega-Guerrero, 2017) y los riesgos de lixiviación e inundación (Zamora et al., 2008). La dinámica del agua del suelo se puede cuantificar, por un lado, mediante mediciones continuas de la infiltración y la retención in situ, pero para ello, se requiere de instrumental costoso y que tiende a ser imprecisos debido a errores humanos y a factores ambientales impredecibles. Por otra lado, la dinámica del agua en suelo se puede estimar mediante modelos 1) Empíricos, como los de Kostiaikov (1932) y Kostiaikov-Lewis (1987), que sólo consideran la superficie y el tiempo del suelo y que, por lo general, son fáciles de calcular, pero resultan inexactos; 2) Cuasi avanzados, como los de Green-Ampt (1911), que consideran parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica y la tensión del suelo, lo que mejora la aproximación, pero no lo suficiente como para aplicarse a todos los tipos de suelo; 3) Redes neuronales artificiales que resuelven modelos como los enumerados anteriormente (Jain y Kumar, 2006); y 4) Modelos mecanicistas como el de Richards, cuyas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven numéricamente mediante programas informáticos, consideran tanto la variación espaciotemporal como los parámetros hidráulicos, lo que aumenta la precisión del modelo (Richards, 1931).

Sin embargo, aún no se sabe cómo afectarán las especies forestales en los sistemas productivos por su competencia por el agua, los nutrientes, la luz, la acidificación del suelo y la erosión, entre otros factores. Los sistemas agroforestales podrían encontrarse con estas desventajas, por lo que es esencial conocer las características, beneficios y los efectos de las distintas especies de sombra posibles sobre los nutrientes y la dinámica del agua en el suelo. Por tanto, el objetivo de este estudio fue modelar la dinámica del agua del suelo de diferentes sistemas agroforestales con cubierta arbórea utilizando la ecuación de Richards, datos de humedad del suelo y datos de precipitación recogidos durante el periodo del 3 de agosto al 12 de octubre del 2022 para determinar láminas infiltradas.

4.4 Metodología

4.4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca Lerma-Santiago en los estados de Querétaro, Colima, Estado de México, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes, San Luis Potosí y Guanajuato, con elevaciones por arriba de los 3000 metros del nivel del mar hasta las desembocaduras de los ríos al mar y una superficie de 53, 805 km². La temperatura media anual es de 20 a 25°C, mientras que las temperaturas del mes más frío pueden descender por debajo del punto de congelación, y las temperaturas del mes más caluroso puede superar los 35 °C. La vegetación predominante es bastante heterogénea, desde bosques templados a vegetación semidesérticas, vegetación acuática y zonas agrícolas (INGEI, 2021). Los climas principales dentro de la cuenca: Árido (38.13% del área total), semiárido (40.23% del área total). En el clima semiárido, la precipitación anual oscila entre 250 y 500 mm por año. El tipo de suelo predominante son los vertisoles pélicos de textura predominantemente arcillosa, con una pendiente del terreno inferior al 2% (Figura 14). En el clima árido, las precipitaciones anuales son menores de 250 mm al año, con lluvias en verano. Suelos predominantes son leptosoles de textura limosa arcillosa (INEGI, 2021).

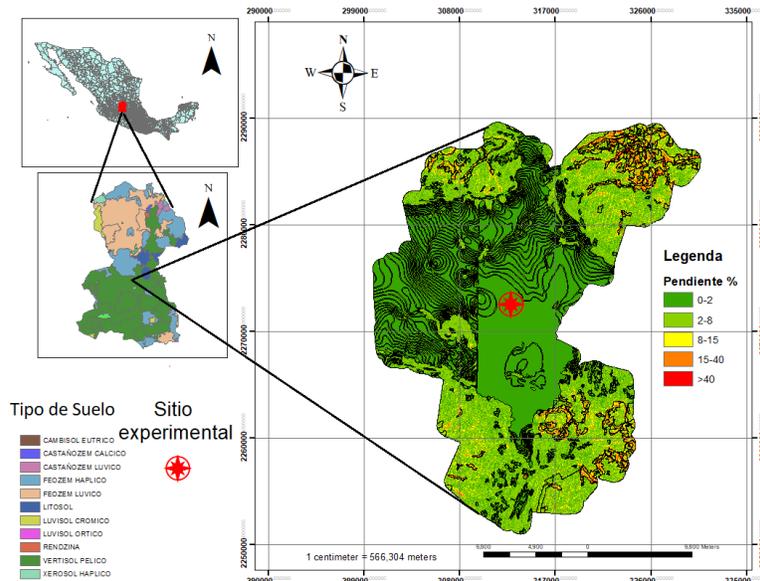


Figura 14. Área de estudio y ubicación del sitio experimental (INIFAP).

4.4.1.1 Sitio experimental

El sitio de estudio se localiza en el campo experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de México (INIFAP) sede Bajío, ubicado en la carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, en Celaya, Guanajuato México. De acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García, el área de estudio se encuentra en una zona climática Cwa, caracterizada por un clima cálido con lluvias en verano e inviernos secos, con temperaturas y precipitaciones medias anuales de 15 a 25°C y de 400 a 600 mm, respectivamente. La zona de estudio se encuentra a una altitud de 1767 metros sobre el nivel del mar (García 2001).

4.4.2 Diseño experimental

En el experimento de campo se aplicaron dos arreglos agroforestales y una parcela de maíz de temporal como testigo. Los sistemas agroforestales incluyen arboretum (Ar) y árboles intercalados con cultivos (AIC). El sistema Ar tiene una disposición agroforestal densa con una variedad de especies arbóreas autóctonas adaptadas a las condiciones climáticas de la región. Los árboles están dispuestos (plantados) en una plantación de 3 metros de ancho por 3 metros de separación y tienen aproximadamente veinte años de edad. Al mismo tiempo, también se produce forraje en la parcela, que se destina a la alimentación de ovejas. En el sistema AIC, los árboles están dispuestos callejones de una separación aproximada de 5 m por 3 m y tienen una edad promedio de 20 años. La parcela de control lleva 25 años cultivando maíz de forma semimecanizada en condiciones de temporal, con aplicaciones esporádicas de riego cuando las precipitaciones no son suficientes para satisfacer las demandas de evapotranspiración. El cultivo de maíz se plantó en surcos con una distancia de 65 cm entre cada uno, a una profundidad de 0 a 25 cm (Figura 15). Durante el periodo comprendido entre el 3 de agosto y el 12 de octubre de 2022, se llevaron a cabo las mediciones en el sitio experimental.

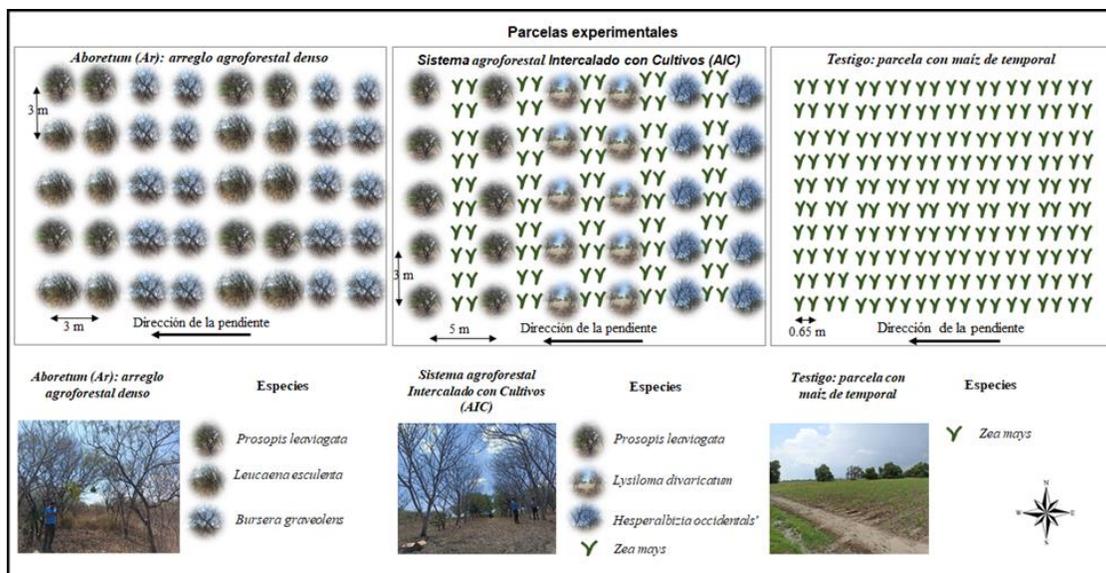


Figura 15. Sistema agroforestal denso e intercalado con cultivos y maíz de temporal.

4.4.3 Especies objetivo

La selección de las especies se basó en su capacidad para prosperar en un clima semiárido y en su potencial como plantas agroforestales multipropósito.

Prosopis leaviagata, conocida como mezquite, crece en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1500 metros, desde el sur de Estados Unidos hasta Sudamérica (Bhansali, 2010). Esta especie es capaz de prosperar en climas semiáridos a templados, es tolerante a la sequía y a las temperaturas frías, prefiere suelos francos a arenosos, aunque contengan altos niveles de pedregosidad, tolera suelos pobres y tepetrosos, requiere niveles de humedad de medios a altos y es útil para el control de la erosión (Vásquez-Méndez et al., 2011). *Bursera graveolens*, conocida como copal, crece en altitudes desde los 200 a 1500 metros sobre el nivel del mar, tiene una distribución desde México hasta el Ecuador (Rzedowski, 2005). Esta especie es apreciada por su resina que tiene usos medicinales y religiosos, además de ser una especie adaptada a los climas semiáridos y cálidos (Romero-Estrada et al., 2016).

Leucaena esculenta, conocida como huaje, crece en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1000 metros sobre el nivel del mar y se distribuye principalmente en regiones tropicales y subtropicales de México y América Central. Es una especie

apreciada por su alto contenido de proteína y usado generalmente como árbol forrajero, además de ser una especie muy característica de la selva baja caducifolia de México (Peralta-Júarez et al., 2016). *Lysiloma divaricatum*, conocida como palo prieto, crece desde el nivel del mar hasta los 1500 sobre el nivel del mar y tiene una distribución desde América del norte hasta la parte norte de América del sur. Es una especie apreciada principalmente por su madera y para uso forrajero, ya que su madera es duradera y su forraje tiene alto contenido nutricional (Sánchez-Hernández et al., 2018).

Hesperalbizia occidentalis, conocida como palo blanco, crece desde los 500 a los 2000 metros sobre el nivel del mar y tiene una distribución desde América del norte, más específicamente el oeste de Estados Unidos y en México. También es una especie forrajera y usada como restaurador ambiental ya que es una leguminosa que fija nitrógeno en el suelo y tiene un valor ornamental (Stewart and Dunsdon, 2000). *Zea mays*, conocido como maíz, crece desde el nivel del mar hasta los 3000 metros sobre el nivel del mar, es una planta nativa americana pero ahora se distribuye en todo el mundo. Es una de las plantas más importantes del mundo por su valor nutricional e importancia biocultural (Salvador, 2001).

4.4.4 Medición de variables edafoclimáticas

4.4.4.1 Caracterización del suelo

La caracterización del suelo de los dos sistemas agroforestales y el testigo se realizó mediante una excavación y descripción de sus perfiles. Se extrajo una muestra de suelo de cada uno de los sistemas agroforestales y el testigo, para determinar la textura con el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), la densidad aparente con el método de la probeta, la densidad real con el método del picnómetro (Blake, 2015) y el contenido de materia orgánica con el método de Walkley y Black (De Vos et al., 2007). Con el método de Walkley-Black se mide el carbono orgánico total del suelo, pero no se toma en cuenta los ácidos húmicos y fúlvicos, ni el carbono activo e inactivo capturado por las arcillas (Ladoni et al., 2010). Para evitar sesgos causados por la periferia de las parcelas, las muestras de suelo se recogieron en el centro de los sistemas de producción (She et al., 2015). En el sistema Ar, el muestreo para la

determinación del contenido de carbono orgánico se realizó bajo cobertura de la especie *Leucaena esculenta*, conocida como huaje, mientras que, en el sistema AIC, el muestreo se realizó bajo la cobertura de la especie *Lysiloma divaricatum*, conocida como palo prieto.

4.4.4.2 Contenido de humedad del suelo

La precipitación se monitoreó con una estación meteorológica marca Davis Vantage pro-2®, modelo 6162, ubicada a menos de dos kilómetros de los sistemas estudiados. La estación, que dispone de un balancín de vaciado cada 0.25 mm, tiene una precisión del ± 4 % para intensidades de lluvia de hasta 50 mm h^{-1} y del ± 5 % para intensidades de lluvia superiores a 50 mm h^{-1} . El contenido de humedad volumétrica del suelo se midió utilizando un TDR (Time Domain Reflectometry) FIELDSCOUT 300® con una precisión del ± 3 % VWC (volumetric water content por sus siglas en inglés) en dos mallas rectangulares perpendiculares entre sí, de 150 cm de longitud y 30 cm de profundidad (Figura 16b y 16d). En cada malla hay 18 puntos de medición, dispuestos en tres filas y seis columnas, separadas por 10 cm y 30 cm, respectivamente. Como la mayor parte del agua y los nutrientes son absorbidos por las plantas a profundidades de 10, 20 y 30 cm (Hombegowda et al., 2020), se midió la humedad a estas profundidades. La variable de respuesta es la profundidad del suelo, la cubierta arbórea y la fecha de medición, con 12 repeticiones de humedad por profundidad del suelo. Para evaluar cómo influye la cubierta vegetal en el comportamiento de la humedad del suelo, se realizaron las mediciones de la precipitación bajo el dosel de los árboles de las especies de estudio (tres especies por sistema agroforestal). En el sistema Ar, se hicieron bajo cuatro árboles adyacentes de cada especie (Figura 16a), mientras que, en el sistema AIC, se hicieron bajo dos árboles adyacentes de cada especie (Figura 16c). En el sistema testigo, se utilizaron dos mallas rectangulares de las mismas dimensiones en el centro de la parcela para medir los niveles de humedad. Durante la época de lluvias (verano), se realizaron las mediciones de la precipitación en cinco fechas: 3 de agosto, 17 de agosto, 15 de septiembre, 27 de septiembre y 12 de octubre de 2022, designadas como fechas 1, 2, 3, 4 y 5.

a)

b)

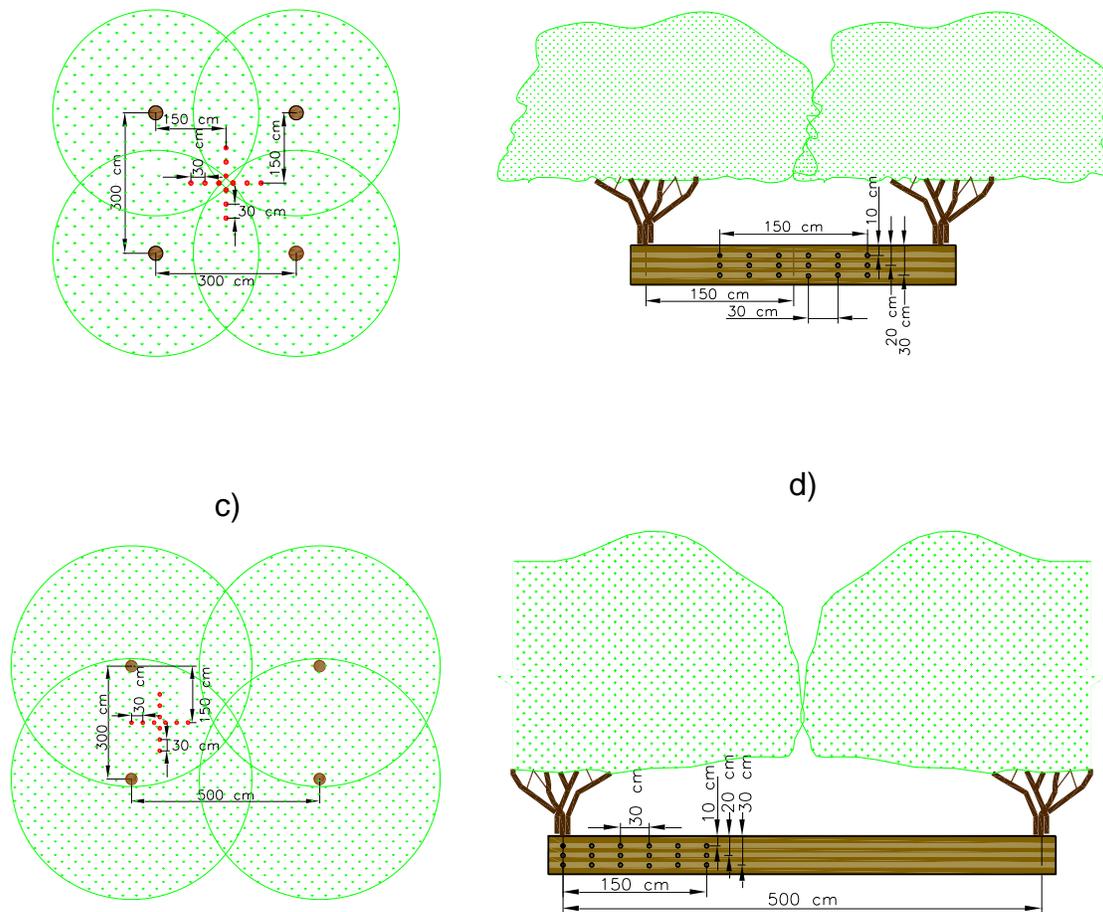


Figura 16. Estrategia de medición de la humedad en el suelo in situ. a) Sistema agroforestal denso (Ar), vista superior, b) Sistema agroforestal denso (Ar), vista lateral, c) Sistema de AIC, vista superior, d) Sistema de AIC, vista lateral.

4.4.5 Estimación de la lámina infiltrada en el suelo

4.4.5.1 Modelo matemático del movimiento del agua en suelo

La ecuación de Richards (1931) describe el movimiento del agua a través de un medio poroso rígido y parcialmente saturado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[xK(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

donde θ es la humedad volumétrica ($cm^3 cm^{-3}$), t es el tiempo (min), x es la coordenada horizontal (cm), $K(h)$ es la conductividad hidráulica insaturada, h es la

tensión (cm) y z es la coordenada vertical que es igual a la profundidad medida positivamente hacia arriba desde la superficie freática (cm).

4.4.5.2 Modelo numérico Hydrus 2D

El modelo Hydrus-2D simula el movimiento bidimensional del agua del suelo a lo largo del tiempo en el perfil de suelo parcialmente saturado/saturado. Dicho modelo resuelve con el método numérico de elementos finitos la ecuación de Richards (1) que describe el flujo de agua en medio no saturado/saturados, incorporando la absorción de agua por las raíces de la planta (Šimůnek et al., 2012).

Los perfiles del suelo fueron discretizados en 2 o 3 horizontes a 10 cm y 20 cm o a 10, 20 y 30 cm, en función de la homogeneidad de la humedad del suelo bajo cada cubierta arbórea. Las propiedades hidráulicas de la zona no saturada del suelo (relaciones constitutivas) pueden ser descritas usando las funciones analíticas de Van Genuchten (1980), entre otras (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

donde S_e es el grado efectivo de saturación ($cm^3 cm^{-3}$); θ_r es el contenido de agua residual ($cm^3 cm^{-3}$); θ_s es el contenido de agua a saturación ($cm^3 cm^{-3}$); K_s es la conductividad hidráulica saturada ($cm min^{-1}$); α , n , l y m son parámetros empíricos de ajuste, donde α está relacionado con el inverso de la presión de entrada de aire (cm^{-1}), n está relacionado con la distribución de tamaño de poros (-), l está relacionado con la tortuosidad (-) y $m = 1 - 1/n$.

El software utiliza una interfaz gráfica para la gestión de entrada de datos, la edición y discretización de nodos, la asignación de parámetros, la simulación del escenario adoptado y la visualización de resultados, incluyendo un pequeño catálogo de propiedades hidráulicas de suelos no saturados (Carsel y Parish, 1988), y un conjunto de funciones de pedotransferencia basado en redes neuronales. Los parámetros del modelo se ajustaron mediante simulaciones inversas, asignando los

datos de humedad del suelo como datos de referencia para la precipitación por debajo de la cobertura arbórea y la lámina infiltrada.

4.4.5.3 Escenarios de simulación en Hydrus 2D

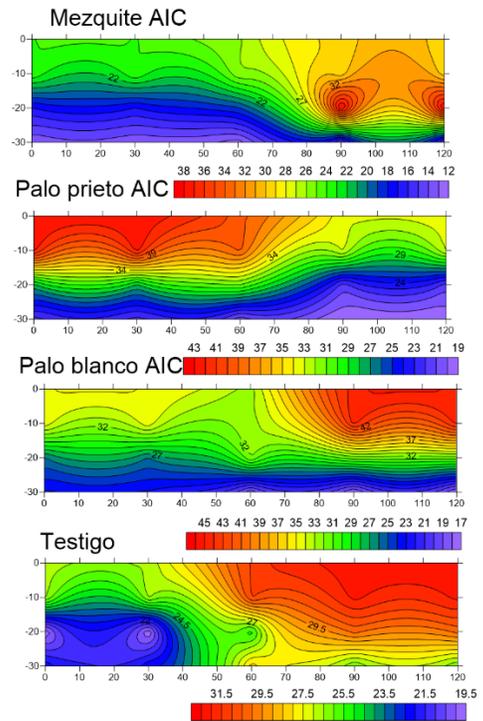
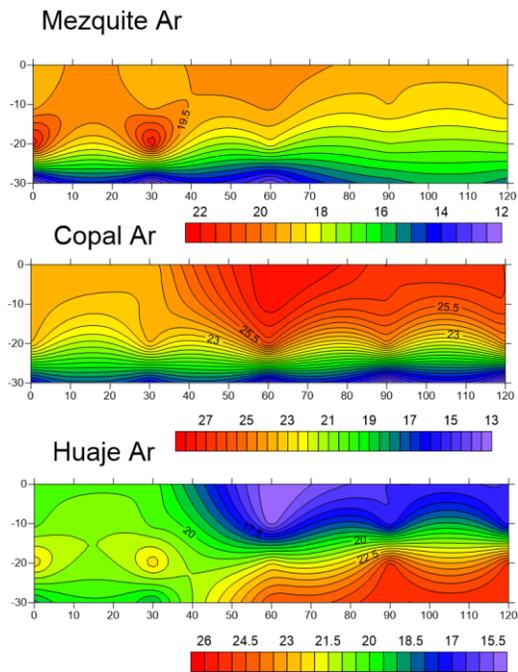
La simulación consistió en predecir el flujo de agua en un perfil de suelo con dos o tres horizontes de 10 cm, abarcando la profundidad efectiva de raíz de las especies de cada sistema agroforestal. Se observó el período, comprendido entre el 3 de agosto y el 12 de octubre del 2022, en el que se produjeron diferentes contenidos de humedad como consecuencia de las precipitaciones generadas durante este periodo de tiempo (Figura 17). Para la simulación de los sistemas agroforestales y el sistema convencional (Testigo) analizados bajo las diferentes coberturas arbóreas se utilizó el módulo directo de Hydrus 2D, considerando los datos de precipitación, la profundidad del horizonte y la textura del suelo en cada horizonte.

Condiciones iniciales. La condición inicial del perfil de suelo fue la humedad volumétrica ($cm^3 cm^{-3}$) de la primera medición en los puntos seleccionados (Figura 17).

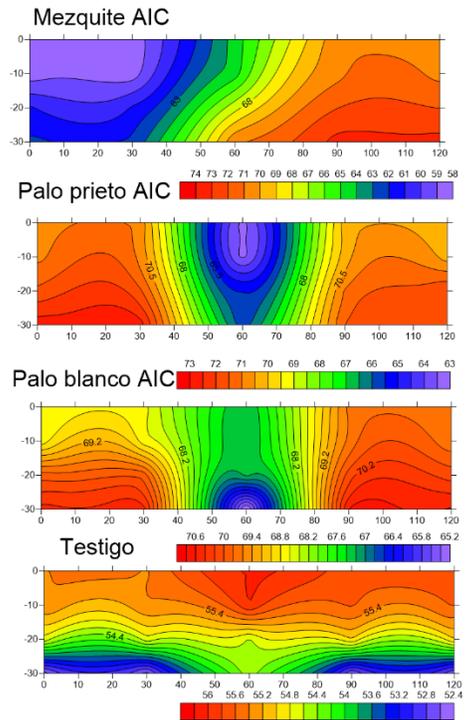
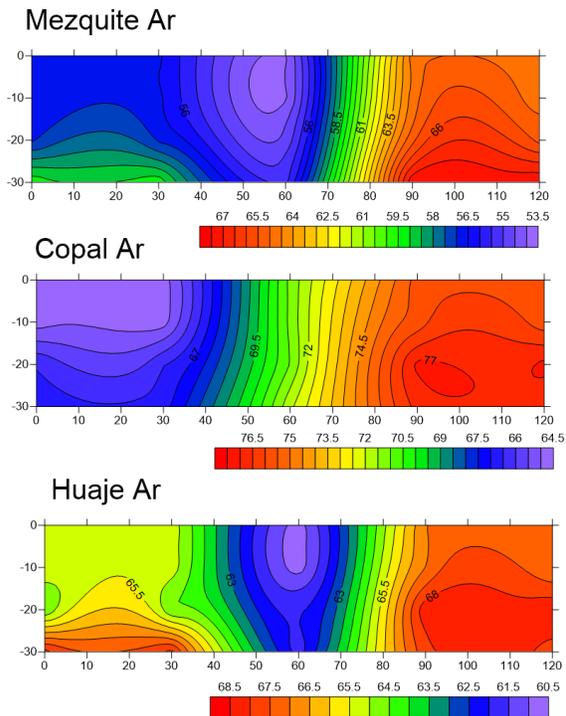
Condiciones de contorno. Se implementó una condición Atmospheric BC con una condición límite de escorrentía superficial para el límite superior y una condición Free Drainage para el límite inferior.

Evapotranspiración. Se consideró la evapotranspiración activa durante todos los días conforme al cálculo hecho con la ecuación de Penman Monteith.

Discretización de espacio y tiempo. Para modelizar la humedad del suelo, los puntos de medición se promediaron de forma que se discretizaron 9 nodos, correspondientes a 3 puntos de medición horizontales cada 30 cm y 3 puntos de medición verticales cada 10 cm (Figura 18). La discretización fue implementada bajo cada especie de cubierta vegetal en ambos sistemas agroforestales.



a) Fecha 1: 3 de agosto del 2022



b) Fecha 2: 17 de agosto del 2022

Figura 17. Contornos de los contenidos de humedad en el suelo (humedad volumétrica %) bajo las diferentes coberturas estudiadas.

Para la discretización de la ecuación de Richards, se utilizó un esquema de elementos finitos lineales en masa (Figura 18), con una densidad de malla más fina en los límites superior de 1 cm e inferior de 3 cm.

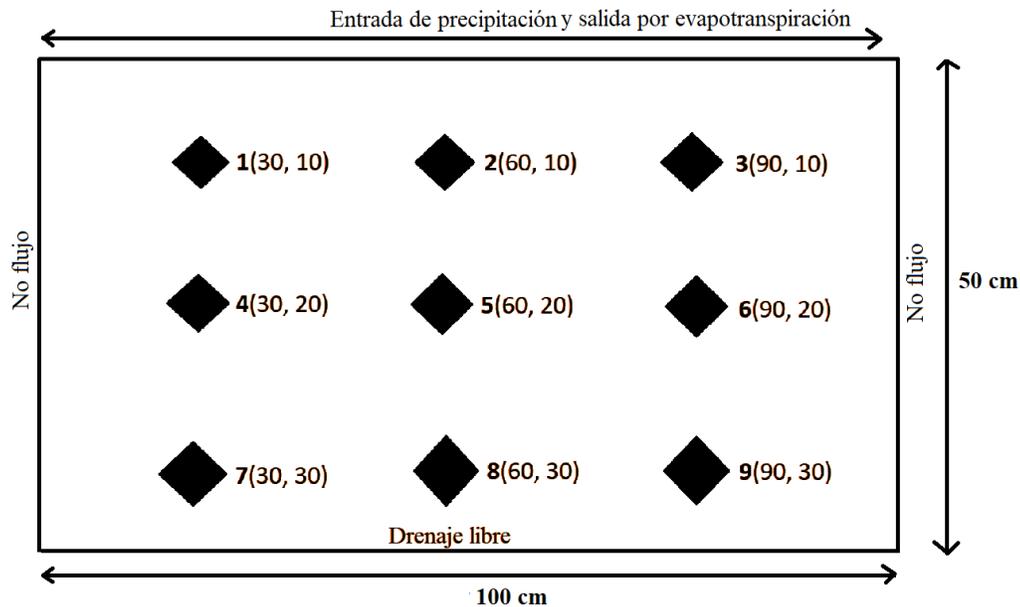


Figura 18. Esquema de discretización en mallado en un perfil de suelo en 2 D. Cada punto negro representa un nodo N y cada línea representa un elemento o segmento.

Precipitación. Se introdujeron diariamente las precipitaciones según se midió en la estación meteorológica durante los 71 días (del 3 de agosto al 12 de octubre de 2022) (Figura 19).

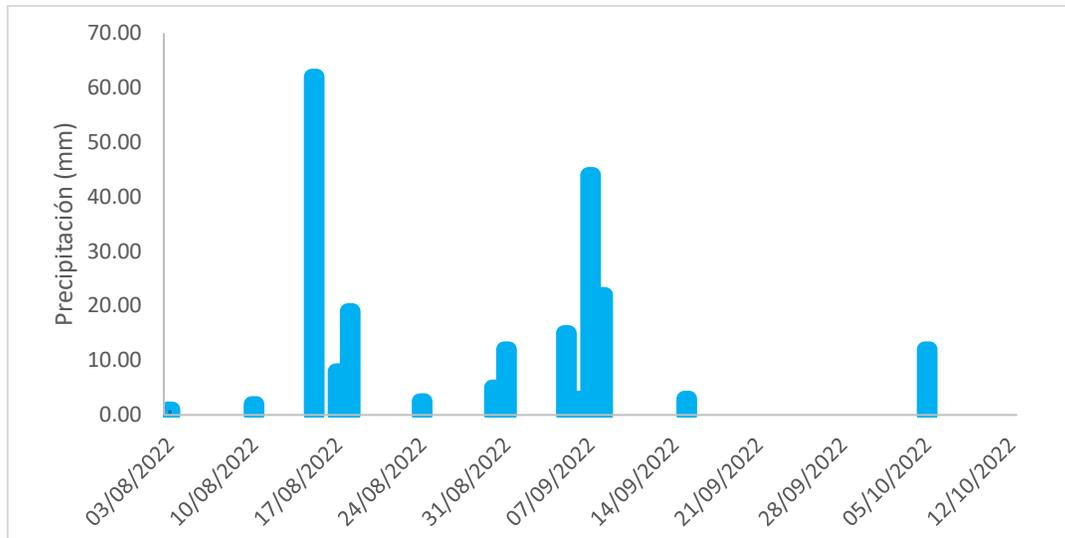


Figura 19. Comportamiento de las precipitaciones durante el período del 03 de agosto al 12 de octubre del 2022.

Los valores de contenido de humedad residual, θ_r , contenido de humedad a saturación, θ_s , valor α , parámetro n y la conductividad hidráulica saturada, K_s requeridos por las funciones de Van Genuchten-Mualem se asignaron, de acuerdo con Carsel y Parrish (1988), utilizando el método de Bouyoucos, que da valores basados en la textura del suelo. De acuerdo con las funciones de Van Genuchten y Mualem (1980), los parámetros hidráulicos del suelo correspondieron a una textura franco-arcillosa limosa, obtenida por el método de Bouyoucos en todos los suelos analizados (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros iniciales tomado de las aproximaciones de Carsel y Parrish (1988) de acuerdo con la textura del suelo determinada por Bouyoucos.

Parámetros ajustados	
Contenido de humedad residual (θ_r) ($cm^3 cm^{-3}$)	0.09
Contenido de humedad a saturación (θ_s) ($cm^3 cm^{-3}$)	0.65
Valor (α) ($1/cm$)	0.01
Valor (N)	1.31
Conductividad hidráulica saturada (K_s) (cm/dia)	6.24

2.4.6 Calibración de Hydrus 2D

La calibración del modelo Hydrus 2D consistió en ajustar los parámetros del suelo α, n, K_s para minimizar los errores entre los contenidos de humedad observados y simulados. El periodo de modelización fue de 71 días, del 3 de agosto al 12 de octubre de 2022. Se realizaron cinco mediciones de contenido de humedad a las coberturas de mezquite, copal y huaje del sistema Ar, así como a las coberturas de mezquite, palo prieto y palo blanco del sistema AIC, los días 3 de agosto, 15 de septiembre, 27 de septiembre y 12 de octubre de 2022. Durante el mismo periodo que las mediciones sobre el terreno, se compararon y ajustaron los resultados de modelización generados por Hydrus-2D.

4.4.7 Evaluación del desempeño del modelo Hydrus 2D

La evaluación de las capacidades de la predicción del modelo se realizó con el error medio (ME), la raíz cuadrática del error medio (RMSE) y el índice de Nash y Sutcliffe (NSE) (Willmontt C.J., 1982; Willmontt C. J., et al. 2012):

$$ME = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \right] \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

Donde N es el total de datos, P_i corresponde al i -ésimo data estimado, O_i corresponde al i -ésimo dato observado y \bar{O} es la media de los datos observados.

Para los valores ME y el RMSE, entre más cercanos estén a cero significa que el desempeño del modelo es más certero, por tanto, estaría haciendo una mejor estimación (Willmontt C.J., 1982). Para los valores de NSE se usó el criterio de Ritter y Muñoz-Carpena (2013) (Ritter A. y Muñoz-Carpena R., 2013), insatisfactorio ($NSE > 0.65$), aceptable ($0.65 \leq NSE < 0.80$), bueno ($0.80 \leq NSE < 0.90$) y muy bueno ($NSE > 0.90$).

4.5 Resultados y análisis

4.5.1 Caracterización del suelo

En la Figura 20, se pueden observar los perfiles de suelo de los tres sistemas de producción, en los que se aprecian los efectos generados por su manejo. En los suelos de los sistemas agroforestales se observa una mejor estructura de los agregados del suelo, presentando agregados angulares en el horizonte A y agregados columnares en el horizonte B, en contraste con la estructura agrietada del suelo testigo (Porta Casanellas et al., 2003). De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Saxton & Rawls, 2006), la textura del suelo en los horizontes A y B de los tres sistemas de producción estudiados fue arcillosa, conteniendo hasta un 70.55% de partículas de arcilla. Esto coincide con González et al. (2010), quienes clasificaron los suelos de esta región (Bajío guanajuatense) como vertisoles.

De acuerdo con los datos de porosidad del horizonte A, los suelos del sistema Ar, AIC y testigo presentaron una porosidad de 33.23%, 32.68% y 28.9%, respectivamente; mientras que para el horizonte B, los suelos del sistema Ar, AIC y testigo presentaron una porosidad de 30.80%, 32.01% y 30.01%, respectivamente. Además de que los primeros mostraron estructuras de agregados angulares y columnares, mientras que el segundo presentó estructuras de suelo agrietado. El contenido de carbono en los suelos del sistema Ar, AIC y testigo fue de 2.61 %, 1.30 % y 1.04 %, respectivamente, mientras que el contenido de carbono en el horizonte B fue de 0.52 %, 0.78% y 0.26 %, respectivamente. El sistema Ar (31.52 %) y AIC (32.52 %) presentaron mayor porosidad del suelo y niveles más altos de carbono orgánico en el suelo en ambos horizontes que el sistema convencional (testigo) (29.46 %), lo que indica que mejoran la estructura del suelo debido a que su cobertura vegetal se incorpora continuamente al suelo, creando materia orgánica y manteniendo así la biodiversidad y la porosidad. La descomposición de la materia orgánica en el suelo crea canales y agregados angulares principalmente a lo largo del horizonte A que mejoran la porosidad del suelo (Bottinelli et al., 2015; Brady & Weil, 1999). En los tres sistemas de producción, el contenido de carbono orgánico

fue mayor en el horizonte superficial, lo que puede explicarse por la constante adición de materia orgánica a la parte superior del suelo por parte de la cobertura vegetal (Khaleel et al., 2020; Barbosa-Briones et al., 2019) aunque la incorporación de materia orgánica puede diferir dependiendo de las especies arbóreas de los sistemas (Korkanç, 2014). El contenido de materia orgánica mejora la porosidad del suelo por la actividad de la fauna del suelo y esto se ve reflejado en el contenido de la humedad del suelo (Shukla et al., 2006).

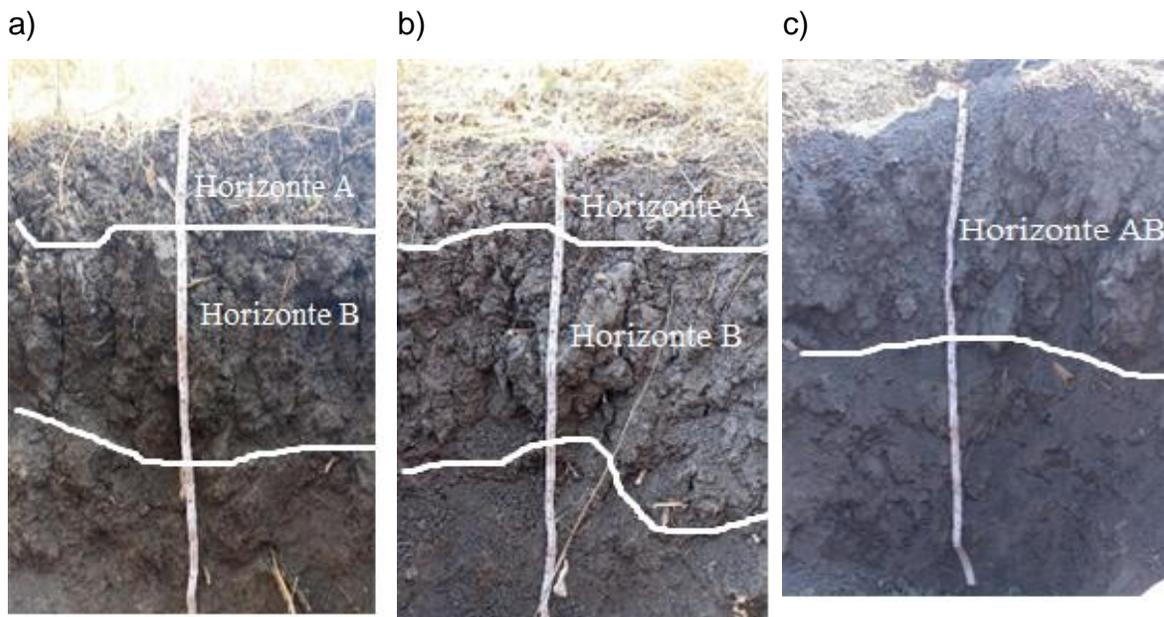


Figura 20. Perfiles de los suelos de los sistemas estudiados: a) Sistema Ar, b) Sistema AIC, c) Testigo.

En el Cuadro 6, se reportan los contenidos de humedad a saturación (θ_s), a capacidad de campo (θ_{cc}) y a punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), la densidad aparente (D_a) y la conductividad hidráulica saturada (K_s), según los valores sugeridos por Saxton y Rawls (2006). Los parámetros hidráulicos del suelo para los tres sistemas estudiados son bastante homogéneos, ya que pertenecen a la misma

clase textural, a excepción de la K_s del horizonte A del sistema convencional (testigo), que es ligeramente mayor a la de los demás sistemas.

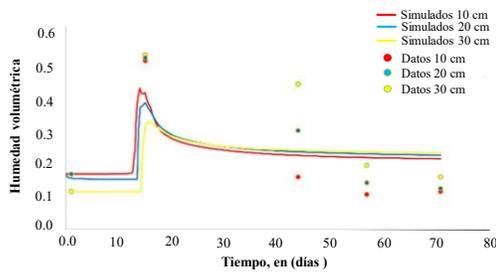
Cuadro 6. Parámetros hídricos de los horizontes de los sistemas seleccionados.

Horizonte	Parámetro	Sistema		
		Ar	AIC	Convencional (Testigo)
A	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.539	0.536	0.553
	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.453	0.453	0.449
	θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.347	0.348	0.345
	D_a (g cm^{-3})	1.220	1.230	1.190
	K_s (mm h^{-1})	1.460	1.320	2.490
B	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.462	0.529	0.518
	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.388	0.455	0.458
	θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.269	0.349	0.350
	D_a (g cm^{-3})	1.430	1.250	1.280
	K_s (mm h^{-1})	0.990	0.960	0.510

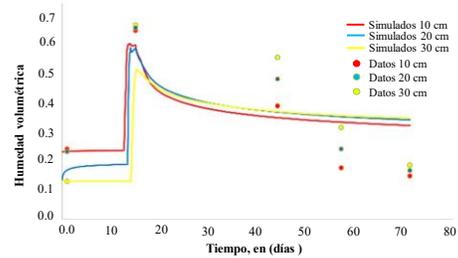
4.5.2 Contenido de humedad en el suelo

De acuerdo con la Figura 21, los datos predichos a partir del modelo de Richards siguen la misma tendencia que los datos experimentales obtenidos en los distintos sistemas agroforestales. La humedad del suelo en todos los sitios estudiados aumentó como resultado de los eventos de lluvia ocurridos entre los días 13 y 15, independientemente si los datos de humedad del suelo cambiaban con el tipo de cubierta arbórea. Los suelos con copal Ar y palo prieto AIC registraron la mayor retención de humedad (Figura 21b y 21e), mientras que los suelos con mezquite Ar y el testigo registraron la menor (Figura 21a y 21g). Esto se debió a que los árboles de copal Ar y palo prieto AIC producen un mayor porcentaje de sombra, lo que resulta en menor evaporación y mayor humedad al estar menos expuestos a la luz solar (Bhark & Small, 2003; Bosi, et al., 2020).

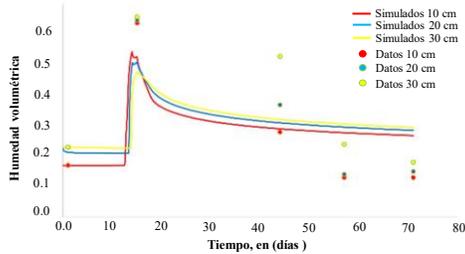
Como el sistema AIC es más abierto y está más expuesto al sol, la humedad es menor en comparación con el sistema Ar, que retiene más humedad, lo cual puede ser una característica positiva o negativa en función del uso al que se destine el sistema (Chamizo et al., 2013). La temperatura puede influir considerablemente en la humedad del suelo (Ni et al., 2019).



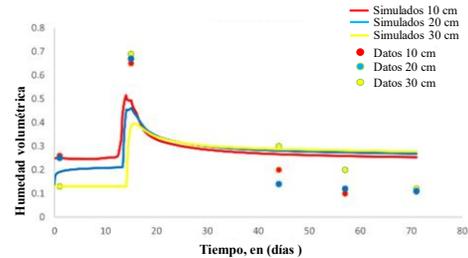
a) Mezquite Ar



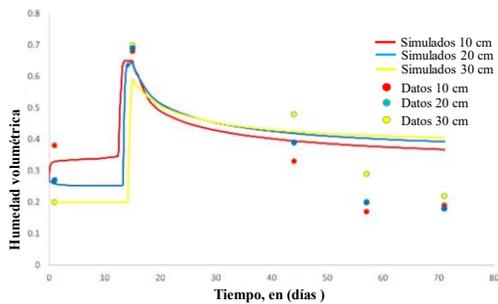
b) Copal Ar



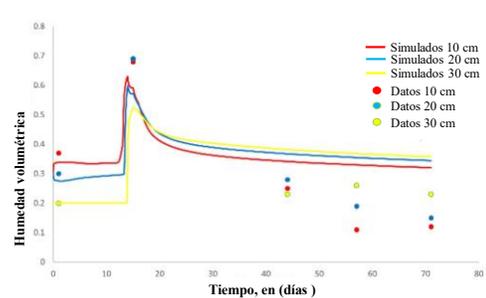
c) Huaje Ar



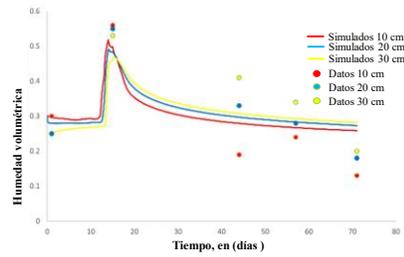
d) Mezquite AIC



e) Palo Prieto AIC



f) Palo Blanco AIC



g) Testigo (Maíz)

Figura 21. Graficas de simulación y puntos de observación de las coberturas de todos los sitios evaluados en los diferentes sistemas.

Cuadro 7. Valores estadísticos del desempeño del modelo antes del ajuste.

	Mezquite Ar	Copal Ar	Huaje Ar	Mezquite AIC	Palo prieto AIC	Palo blanco AIC	Maíz (testigo)
NSE	0.228	0.147	0.134	0.068	0.685	0.469	0.452
ME	0.105	0.013	-0.039	-0.046	-0.001	-0.065	-0.109
RMSE	0.134	0.143	0.148	0.158	0.104	0.132	0.152

Cuadro 8. Valores estadísticos del desempeño del modelo después del ajuste.

	Mezquite Ar	Copal Ar	Huaje Ar	Mezquite AIC	Palo prieto AIC	Palo blanco AIC	Maíz (testigo)
NSE	0.653	0.652	0.746	0.686	0.714	0.741	0.840
ME	0.009	-0.006	-0.002	-0.014	-0.048	-0.046	-0.005
RMSE	0.102	0.092	0.091	0.104	0.101	0.103	0.075

Dentro de los parámetros estadísticos antes de realizar el ajuste, todos dan un desempeño bajo en el NSE que según Ritter y Muñoz-Carpena (2013), clasificaría como insatisfactorio, a excepción de la humedad bajo palo prieto con un NSE de 0.685 el cual clasificaría como aceptable (Cuadro 7). Mientras que los valores de

ME y RMSE antes de realizar el ajuste, los valores están más alejados del cero que los valores que se obtienen después de realizar el ajuste, eso muestra como mejora la predicción de la modelación después de realizar el ajuste estimación (Willmontt C.J., 1982) (Cuadro 8). Los valores estadísticos después de realizar el ajuste se pueden entrar dentro de la categoría de aceptable según Ritter y Muñoz-Carpena (2013), ya que todos los valores de humedad en el suelo bajo todas las coberturas superan el 0.65 en NSE, siendo la humedad en el suelo en la parcela testigo, la modelación con mayor desempeño, con un NSE de 0.84 entra en la categoría de bueno (Ritter y Muñoz-Carpena, 2013). En notable la diferencia que existe en el rendimiento del modelo antes y después de realizar los ajustes pertinentes en la entrada de precipitación, ya que después de realizar estos ajustes el desempeño de la modelación se vuelve aceptable y representativa (Ventrella D. et al., 2019). Una vez realizando el ajuste, se puede observar en el Cuadro 9 bajo las coberturas de Copal Ar, Huaje Ar, Mezquite AIC, Palo prieto AIC y Palo blanco AIC, es donde mayor lámina infiltrada hay y menor bajo Mezquite Ar y el testigo.

Cuadro 9. Lámina infiltrada de los sitios estudiados.

Sitio	Infiltración (cm)
Mezquite Ar	9.89
Copal Ar	13.19
Huaje Ar	13.19
Mezquite AIC	13.19
Palo prieto AIC	13.19
Palo blanco AIC	11.19
Testigo	10.19

4.6 Conclusiones

Existe un efecto positivo en el contenido de humedad en el suelo, en términos del espacio y el tiempo, con sistemas agroforestales respecto a el de monocultivo. Particularmente retuvo mayor humedad en el suelo bajo copal Ar y palo prieto AIC para todas las fechas. Hay mayor infiltración de agua en el suelo bajo sistemas

agroforestales respecto a uno con monocultivo. También existe un efecto positivo para el área foliar respecto a el contenido de humedad en el suelo, entre mayor cobertura vegetal, mayor contenido de humedad en el suelo. El software Hydrus 2D aproximó de forma aceptable el comportamiento espacio temporal de la humedad en el suelo, por lo que podría usarse como una herramienta confiable para predecir la infiltración de agua en el suelo y con fines de manejo del suelo.

4.7 Literatura citada

- Alletto, L., Pot, V., Giuliano, S., Costes, M., Perdrieux, F., & Justes, E. (2015). Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243, 18-28.
- Aguilar-García, R., & Ortega-Guerrero, M. A. (2017). Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(2), 91-104.
- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5–16.
- Bai, X., Jia, X., Jia, Y., & Hu, W. (2020). Modeling long-term soil water dynamics in response to land-use change in a semi-arid area. *Journal of Hydrology*, 585, 124824.
- Barbosa-Briones, E., Cardona-Benavides, A., Reyes-Hernández, H., & Muñoz-Robles, C. (2019). Ecohydrological function of vegetation patches in semi-arid shrublands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 168, 36–45.
- Bhansali, R. R. (2010). Biology and multiplication of *Prosopis* species grown in the Thar Desert. *Desert Plants: Biology and Biotechnology*, 371-406.

- Bhark, E. W., & Small, E. E. (2003). Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan desert, New Mexico. *Ecosystems*, 6(2), 185–196.
- Bosi, C., Pezzopane, J. R. M., & Sentelhas, P. C. (2020). Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. *Agroforestry Systems*, 94(2), 429–440.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, 146(PA), 118–124.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils¹. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). The Nature properties of soils, and Pearson and Prentice Hall, USA. *New Jersey*.
- Carnero Carnero, E. G., & Carnero Guzmán, G. G. (2018). Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(4), 439-450.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*, 24(5), 755-769.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., & Domingo, F. (2013). The role of biological soil crusts in soil moisture dynamics in two semiarid ecosystems with contrasting soil textures. *Journal of Hydrology*, 489, 74–84.
- Chen, L., & Young, M. H. (2006). Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resources Research*, 42(7).
- Chen, M., Willgoose, G. R., & Saco, P. M. (2014). Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D. *Hydrological Processes*, 28(2), 171–185.

- Elnesr, M. N., & Alazba, A. A. (2019). Computational evaluations of HYDRUS simulations of drip irrigation in 2D and 3D domains (i-Surface drippers). *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 189–205.
- Fan, Y., Shao, X., Gong, J., & Wang, Y. (2020). An empirical model for estimating soil wetting pattern dimensions during film hole irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1765–1779.
- Fassbender, H. W. (1987). Nutrient cycling in agroforestry systems of coffee (*Coffea arabica*) with shade trees in the Central Experiment of CATIE. *Advances in agroforestry research*, 155-165.
- García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.
- Giraldo, J. F., & Jaramillo, A. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo.
- Hasselquist, N. J., Benegas, L., Roupsard, O., Malmer, A., & Ilstedt, U. (2018). Canopy cover effects on local soil water dynamics in a tropical agroforestry system: Evaporation drives soil water isotopic enrichment. *Hydrological processes*, 32(8), 994-1004.
- Jackson, N. A., & Wallace, J. C. (1999). Analysis of soil water dynamics in an agroforestry system based on detailed soil water records from time-domain reflectometry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(4), 517-527.
- Lei, G., Fan, G., Zeng, W., & Huang, J. (2020). Estimating parameters for the Kostiakov-Lewis infiltration model from soil physical properties. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 166-180.
- Livesley, S. J., Gregory, P. J., & Buresh, R. J. (2004). Competition in tree row agroforestry systems. 3. Soil water distribution and dynamics. *Plant and soil*, 264, 129-139.
- Jain, A., & Kumar, A. (2006). An evaluation of artificial neural network technique for the determination of infiltration model parameters. *Applied Soft Computing Journal*, 6(3), 272–282.

- Khaleel, A. A., Sauer, T. J., & Tyndall, J. C. (2020). Changes in deep soil organic carbon and soil properties beneath tree windbreak plantings in the U.S. Great Plains. *Agroforestry Systems*, 94(2), 565–581.
- Korkanç, S. Y. (2014). Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties. *CATENA*, 123, 62–69.
- Mualem, Y. (1976). *A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media* (Vol. 12, Issue 3).
- Muñoz-Villers, L. E., Geris, J., Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., & Dawson, T. (2020). Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 1649-1668.
- Murray Núñez, R., Bojórquez Serrano J. I., Hernández Jiménez A., Orozco Benítez M. G., García Paredes J. D., Gómez Aguilar J. R., Ontiveros Guerra H., Aguirre Ortega J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Bio Ciencias*. 1(3), 27-35.
- Nevins, C. J., Strauss, S. L., & Inglett, P. W. (2020). Biological soil crusts enhance moisture and nutrients in the upper rooting zone of sandy soil agroecosystems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(5), 615–626.
- Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Ng, C. W. W., & Garg, A. (2019). Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling. *Journal of Hydrology*, 571, 494–502.
- Nie, W., Ma, X., & Fei, L. (2017). Evaluation of Infiltration Models and Variability of Soil Infiltration Properties at Multiple Scales. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 589–599.
- Peralta-Juárez, I., Gómez-Campos, A., Romero-Castillo, P. A., & Reyes-Dorantes, A. (2017). Anthropocentric use of the guaje leucaena esculenta (Moc. & Sessé

- Ex. Dc.) Benth, in two communities in the mixteca baja region of Oaxaca, Mexico. *Polibotánica*, (43), 349-364.
- Pérez-Nieto, J., Valdés-Velarde, E., Hernández-San Román, M. E., & Ordaz-Chaparro, V. (2005). Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia*, 39(4), 409–418.
- Ponce-Rodríguez, M. D. C., Carrete-Carreón, F. O., Núñez-Fernández, G. A., Muñoz-Ramos, J. de J., & Pérez-López, M. E. (2021). Keyline in bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for soil and water conservation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17).
- Rhoades, C. C. (1996). Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural forest and savanna ecosystems. *Agroforestry systems*, 35, 71-94.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333.
- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.
- Romero-Estrada, A., Maldonado-Magaña, A., González-Christen, J., Bahena, S. M., Garduño-Ramírez, M. L., Rodríguez-López, V., & Alvarez, L. (2016). Anti-inflammatory and antioxidative effects of six pentacyclic triterpenes isolated from the Mexican copal resin of *Bursera copallifera*. *BMC complementary and alternative medicine*, 16(1), 1-10.
- Rzedowski, J., Lemos, R. M., & de Rzedowski, G. C. (2005). Inventario del conocimiento taxonómico, así como de la diversidad y del endemismo regionales de las especies mexicanas de *Bursera* (Burseraceae). *Acta Botanica Mexicana*, (70), 85-111.
- Salvador, R. (2001). Maíz. *Publicaciones del Programa Nacional de Etnobotánica. México. Universidad Autónoma Chapingo*.

- Sánchez Hernández, M. Á., Fierros González, A. M., Velázquez Martínez, A., Santos Posadas, H. M. D. L., Aldrete, A., & Cortés Díaz, E. (2018). Estructura, riqueza y diversidad de especies de árboles en un bosque tropical caducifolio de Morelos. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 131-156.
- Schroth, G., & Sinclair, F. L. (Eds.). (2003). *Trees, crops, and soil fertility: concepts and research methods*. Cabi.
- She, D., Zhang, W., Hopmans, J. W., & Timm, L. C. (2015). Area representative soil water content estimations from limited measurements at time-stable locations or depths. *Journal of Hydrology*, 530, 580–590.
- Shukla, M. K., Lal, R., Ebinger, M., & Meyer, C. (2006). Physical and chemical properties of soils under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 66(4), 673–685.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2012). *The HYDRUS Software Package for Simulating the Two-and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media Technical Manual Version 2.0*.
- Stewart, J. L., & Dunsdon, A. J. (2000). The potential of some neotropical Albizia species and close relatives as fodder resources. *Agroforestry Systems*, 49, 17-30.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3), 225-258.
- Triadis, D., & Broadbridge, P. (2012). The Green–Ampt limit with reference to infiltration coefficients. *Water Resources Research*, 48(7).
- Tsuyoshi, M. (2006). Water flow in soils. In *Developments in Agricultural Engineering* (Vol. 10, Issue C).
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A., & Álvarez-Buylla, E. R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177.

- Van Genuchten M. T. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. SOIL SCI. SOC. AM J., VOL 44.
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E., Oleschko, K., Hernández-Sandoval, L., & Domínguez-Cortázar, M. A. (2011). Soil erosion processes in semiarid areas: the importance of native vegetation. *INTECH Open Access Publisher*, 1, 25-41.
- Ventrella, D., Castellini, M., Di Prima, S., Garofalo, P., & Lassabatère, L. (2019). Assessment of the physically-based Hydrus-1D model for simulating the water fluxes of a Mediterranean cropping system. *Water (Switzerland)*, 11(8).
- Wallace, J. S., Young, A., & Ong, C. K. (2005). 26 The potential of agroforestry for sustainable land and water management. *This page intentionally left blank*, 652.
- Wang, C., Zhao, C. Y., Xu, Z. L., Wang, Y., & Peng, H. H. (2013). Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment. *Journal of Arid Land*, 5(2), 207–219.
- Willmott, C.J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc*, 63, 1309–1313.
- Willmott, C.J.; Robeson, S.M.; Matsuura, K. A (2012). Refined index of model performance. *Int. J. Climatol.* 32, 2088–2094
- Zamora, F., Rodríguez, N., Torres, D., & Yendis, H. (2008). Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro*, 20(3), 193-199.
- Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, J., Zhang, W., Zou, X., Liu, W., & Jiang, X. (2019). Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system? *Soil and Tillage Research*, 191, 327–339.