



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN
SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE

TECNOLOGÍA AGROFORESTAL Y SU IMPACTO EN EL BALANCE HÍDRICO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

DEYANIRA QUITERIO MEDEL

Bajo la supervisión de:

DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO



Chapingo, Edo. De México, junio del 2025

TECNOLOGÍA AGROFORESTAL Y SU IMPACTO EN EL BALANCE HÍDRICO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

Tesis realizada por **DEYANIRA QUITERIO MEDEL** bajo la dirección 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



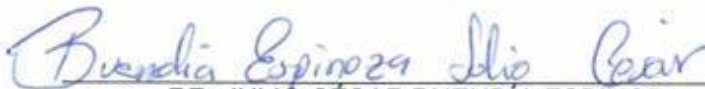
DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

ASESOR



DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
DEDICATORIAS	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
1.1.1 Objetivo general.....	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.1.3 Hipótesis	5
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Agroforestería.....	6
2.2 Sistemas agroforestales (SAF)	7
2.2.1 Tecnología agroforestal de barreras vivas con nopal	8
2.3 Agroforestería y los recursos hídricos	9
2.4 Cuenca hidrográfica	9
2.5 Ciclo hidrológico.....	10
2.6 Balance hídrico	11
2.6.1 Precipitación	11
2.6.2 Escurrimiento Superficial.....	12
2.6.3 Evapotranspiración	13
2.6.4 Infiltración	13
2.7 Modelo hidrológico.....	13
2.8 Modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)	14
2.9 Literatura citada	15
3 CARACTERIZACIÓN DE DOS MICROCUENCAS DENTRO DEL ACUIFERO CALERA, ZACATECAS.....	21
3.1 Resumen	21
3.2 Abstract.....	22

3.3	INTRODUCCIÓN.....	23
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.4.1	Área de estudio.....	24
3.4.2	Microcuencas de estudio	25
3.4.3	Clasificación supervisada.....	28
3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
3.5.1	Análisis morfométrico	30
3.5.2	Clasificación supervisada.....	37
3.6	CONCLUSIONES	39
3.7	Literatura citada	40
4	ANÁLISIS DE LLUVIA- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN DOS MICROCUENCAS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA.....	45
4.1	Resumen	45
4.2	Abstract.....	46
4.3	INTRODUCCIÓN.....	47
4.4	MATERIALES Y MÉTODOS	48
4.4.1	Área de estudio.....	48
4.4.2	Microcuencas de estudio	49
4.4.3	Uso de suelo	52
4.4.4	Caracterización del suelo.....	55
4.4.5	Precipitación	56
4.4.6	Evapotranspiración	59
4.4.7	Retención por follaje.....	59
4.4.8	Escorrimento superficial	60
4.4.9	Balance hídrico	62
4.4.10	Estimación de la infiltración.....	62
4.4.11	Modelación de escurrimiento superficial con HEC-HMS.....	62
4.4.12	Hidrograma unitario del SCS	63
4.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.5.1	Caracterización del suelo.....	64
4.5.2	Número de curva.....	65
4.5.3	Balance hídrico	68
4.5.4	Modelación de escurrimiento superficial.....	71
4.6	CONCLUSIONES	77

4.7	Literatura citada	78
-----	-------------------------	----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Fórmulas para el cálculo de parámetros morfométricos en cuencas	26
Cuadro 2. Orden de las corrientes en la microcuenca el Maguey.....	36
Cuadro 3. Orden de las corrientes en la microcuenca Pánuco	36
Cuadro 4. Resultado de los parámetros morfométricos de las microcuencas	37
Cuadro 5. Características de las microcuencas.....	51
Cuadro 6. Características hidráulicas del suelo de las microcuencas	56
Cuadro 7. Número de curva de la microcuenca El Maguey.....	66
Cuadro 8. Número de curva de la microcuenca Pánuco.....	67
Cuadro 9. Condición de humedad antecedente por evento de lluvia.	68
Cuadro 10. Parámetros para la modelación en HEC-HMS.....	71
Cuadro 11. Balance hídrico en volumen y láminas de las microcuencas.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Definición de Perenne Multipropósito	8
Figura 2. Ciclo Hidrológico.....	10
Figura 3. Hietograma con sus principales elementos.....	12
Figura 4. Curva hipsométrica de la microcuenca el Maguey	33
Figura 5. Curva hipsométrica de la microcuenca Pánuco.....	33
Figura 6. Número de orden de la red de drenaje del Maguey	35
Figura 7. Número de orden de la red de drenaje Pánuco.....	35
Figura 8. Localización del sitio de estudio.....	49
Figura 9. Modelo para delimitar microcuenca en ArcGIS pro.	50
Figura 10. Localización de las microcuencas.....	51
Figura 11. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca el Maguey.....	53
Figura 12. Pastoreo de ganado bovino dentro de la microcuenca.....	53
Figura 13. Diseño de las barreras vivas de nopal (Opuntia spp.).....	54
Figura 14. Microcuenca Pánuco.....	55
Figura 15. Estaciones meteorológicas Davis 6152 Vantage Pro2®.....	57
Figura 16. Precipitación de la microcuenca El Maguey.....	58
Figura 17. Precipitación de la microcuenca Pánuco.....	58
Figura 18. Evapotranspiración (mm) en ambas microcuencas.....	59
Figura 19. Pruebas de infiltración.....	61
Figura 20. Diagrama del balance hídrico.....	62
Figura 21. Diagrama general de la modelación hidrológica.....	63
Figura 22. Precipitación registrada para la humedad antecedente.....	67
Figura 23. Balance hídrico para el evento de lluvia 26 de julio del 2023.....	68
Figura 24. Balance hídrico para el evento de lluvia 19 de agosto del 2023	69
Figura 25. Balance hídrico para el evento de lluvia 28 de agosto del 2023	69
Figura 26. Balance hídrico para el evento de lluvia 10 de octubre del 2023	69
Figura 27. Balance hídrico para el evento de lluvia 11 de octubre del 2023	70
Figura 28. Balance hídrico para el evento de lluvia 12 de noviembre del 2023	70
Figura 29. Balance hídrico para el evento de lluvia 22 de noviembre del 2023	70
Figura 30. Balance hídrico para el evento de lluvia 03 de diciembre del 2023.....	71
Figura 31. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia del 11 de octubre 2023	72
Figura 32. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.....	72
Figura 33. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023.....	73
Figura 34. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023	73
Figura 35. Intensidad de la lluvia en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.....	75
Figura 36. Intensidad de la lluvia en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.....	75

Figura 37. Intensidad de la lluvia en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023..... 76

Figura 38. Intensidad de la lluvia en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023..... 76

DEDICATORIAS

A mi padre, tío, hermano Miguel, por haber sido el pilar en la formación de la persona que soy hoy. Gracias por motivarme, por no soltarme nunca, incluso en los momentos más difíciles. Por anhelar siempre lo mejor para mi vida y estar presente en el instante justo para tenderme la mano. Por enseñarme, con el ejemplo, a valorar el fruto del esfuerzo y la dedicación.

A mi abuela Angela que siempre ha sido como mi madre, quien ha dado todo por y para mí en esta vida y nunca dejaste que me hiciera falta nada, enseñarme todos los días el valor de la constancia y trabajo.

A mi hija Helena Sofía, por ser parte fundamental de cada uno de mis logros, por ser la luz que ilumina mis días y la fuerza que me impulsa a seguir adelante. Gracias por enseñarme a ver la vida con amor, esperanza y valentía. Todo lo que soy y lo que he alcanzado lleva un pedacito de ti.

A mi esposo Daniel, por ser mi compañero de vida, por su constante apoyo, amor y por la comprensión incondicional que me ha brindado a lo largo de estos años.

A mi prima Dayana, por estar ahí siempre en todo momento.

A mi tía Marux, quien me apoyo al inicio y final de esta aventura.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado durante mi formación en el programa de maestría.

A mi ALMA MATER la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad una vez más de cursar mis estudios de Maestría.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández y al Dr. Julio Cesar Buendía Espinoza, excelentes investigadores, por ser mis mentores, por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y por brindarme sus conocimientos, confianza y consejos de vida.

A la C. María Dolores Coronel Sánchez por su ayuda a lo largo de mi estancia en la maestría.

A Grupo Modelo por darme la oportunidad de trabajar dentro de su zona de estudio.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Deyanira Quiterio Medel

Fecha de nacimiento: 30 de agosto de 1994

Lugar de nacimiento: Cuajinicuilapa, Guerrero

CURP: QUMD940830MGRTDY01

Cédula profesional: 14757102



Desarrollo Académico

Bachillerato: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 102 “Juan Pablo Galeana”. Cuajinicuilapa, Guerrero. Generación 2009-2012. Técnico en Agropecuario cédula profesional 7833609.

Licenciatura: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Generación 2015-2019.

Maestría en Ciencias: Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Generación 2024-2025.

TECNOLOGÍA AGROFORESTAL Y SU IMPACTO EN EL BALANCE HÍDRICO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

RESUMEN GENERAL

El abatimiento del acuífero Calera se debe al aumento en la demanda de agua por actividades productivas, el cambio de uso de suelo, la deforestación, el sobrepastoreo y malas prácticas de manejo. Estos factores afectan de manera negativa al balance hídrico, al reducir la capacidad de infiltración y aumentar el escurrimiento superficial. Ante esta problemática, se analizó la influencia de barreras vivas de nopal (*Opuntia* spp.), en el balance hídrico dentro del acuífero, mediante la caracterización hidrológica y de cobertura del suelo, la medición de sus componentes hidrológicos y la estimación de infiltración con el modelo HEC-HMS en las microcuencas el Maguey y Pánuco. Se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG), percepción remota y clasificación supervisada con el algoritmo Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), obteniendo índices Kappa cercanos a 1. El escurrimiento superficial se estimó con el método SCS CN. La estimación de la infiltración se tuvo a partir del balance hídrico y con el modelo hidrológico HEC-HMS. Se seleccionaron siete eventos de lluvia del año 2023, medidos de manera automatizada. Las microcuencas presentaron formas alargadas, relaciones de circularidad entre 0.45 y 0.51, coeficientes de compacidad de 1.39 a 1.46, pendientes medias de cuenca entre 1.40 y 1.69%, y del cauce principal de 1.81 a 3.88%, con una red de drenaje similar (35-36). La microcuenca El Maguey presentó menor escurrimiento (0.148–1.354 mm) con láminas de precipitación de 16.60–23.60 mm e infiltración de 12.571–20.920 mm. En Pánuco, con una precipitación de 15.20 a 23.60 mm, el escurrimiento fue de 0.103 a 1.633 mm y la infiltración entre 19.141 y 14.256 mm, influenciada por valores de evapotranspiración de 0.3 a 2 mm. Las Barreras vivas de nopal favorecen la infiltración y reducen el escurrimiento superficial, contribuyendo a mejorar el balance hídrico.

Palabras claves: Balance hídrico, infiltración, microcuencas, escurrimiento, SIG

Tesis de maestría en ciencias, Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Deyanira Quiterio Medel

Director: Dr. David Cristóbal Acevedo

AGROFORESTRY TECHNOLOGY AND ITS IMPACT ON WATER BALANCE IN A SEMI-ARID ZONE

GENERAL ABSTRACT

The depletion of the Calera aquifer is attributed to increased water demand from productive activities, as well as changes in land use, deforestation, overgrazing, and poor management practices. These factors negatively impact the water balance by reducing infiltration capacity and increasing surface runoff. Given this problem, the study analyzed the influence of live nopal barriers (*Opuntia* spp.) on the aquifer's water balance. This was achieved through hydrological and land cover characterization, measurement of hydrological components, and infiltration estimation using the HEC-HMS model in the El Maguey and Panuco micro-watersheds. Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and supervised classification with the Support Vector Machine (SVM) algorithm were employed, yielding Kappa indices close to 1. Surface runoff was estimated using the SCS-CN method. Infiltration was determined from the water balance and with the HEC-HMS hydrological model. Seven automated rainfall events from 2023 were selected for analysis. The micro-watershed exhibited elongated shapes, circularity ratios between 0.45 and 0.51, compactness coefficients from 1.39 to 1.46, mean basin slopes between 1.40 and 1.69, and main channel slopes from 1.81 to 3.88, with similar drainage network densities (35 to 36). The El Maguey micro-watershed showed higher runoff (0.148–1.354 mm) with precipitation depths of 16.60–23.60 mm and infiltration of 12.571–20.920 mm. In Pánuco, with a precipitation of 15.20 to 23.60 mm, runoff was 1.633 to 0.103 mm and infiltration ranged from 19.141 to 14.256 mm, influenced by evapotranspiration values from 0.3 to 2 mm. Live nopal barriers favor infiltration and reduce surface runoff, thus contributing to an improved water balance.

Keywords: water balance, infiltration, micro-watersheds, runoff, GIS.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La extracción anual de agua a nivel mundial es de 3,900 km³, siendo la agricultura responsable del 85% de este consumo, lo que conlleva a la disminución de acuíferos y desequilibrios en el balance hídrico (Pinilla Mendoza, 2023; Hosseini & Ashraf, 2015). La sobreexplotación del agua en los acuíferos en zonas áridas y semiáridas de México, donde la precipitación anual es inferior a 400 mm, amenaza la seguridad alimentaria, la salud humana y los ecosistemas (Esparza, 2014). El manejo del agua se vuelve fundamental para hacer frente a la demanda constante y fomentar una gestión sostenible, particularmente en respuesta a los desafíos por el cambio climático, el cual afecta directamente en el ciclo hidrológico (Li Y., et al., 2020; Escolero et al., 2017; IPCC, 2013).

El acuífero Calera, Zacatecas, es uno de los más sobreexplotados y además se encuentra en una zona semiárida, lo que no favorece su recarga, enfrenta un desafío significativo, ya que, según informes de la Comisión Nacional de Agua [CONAGUA], 2020), experimenta un déficit anual de -4.85 millones de metros cúbicos, provocando el abatimiento del nivel freático. Este déficit se debe al aumento de la demanda de agua en la región, por diversas actividades productivas y factores como el cambio de uso de suelo, la deforestación, el sobrepastoreo y malas prácticas de manejo (Carrillo et al., 2021; Universidad Autónoma Chapingo [UACH], 2019a; UACH, 2019b). Aumentando la vulnerabilidad de la región a la erosión hídrica (Bettoni et al., 2023), donde las partículas del suelo arrastradas por el escurrimiento superficial disminuyen la capacidad del suelo para infiltrar el agua de lluvia (Pizarro et al., 2010), asimismo, provocando cambios negativos en los componentes del balance hídrico (Mekonnen y Manderson, 2023; Escolero et al., 2017).

La sobreexplotación de acuíferos es uno de los problemas que debe resolverse para alcanzar un desarrollo sustentable (Palacios-Vélez et al., 2016) y garantizar la disponibilidad de reservas de los acuíferos (Rivas et al., 2020). Ante esta problemática, es necesario implementar acciones y técnicas conjuntas, ajustadas a las características socioeconómicas de la zona para mejorar la calidad de vida de la población (Alvarado et al., 2020). La introducción de prácticas de conservación de suelo y agua, sistemas agroforestales, promoción de plantaciones forestales y agroecología, entre otras,

representan alternativas importantes para potenciar el papel estratégico del sector agropecuario en la generación de servicios ecosistémicos, especialmente en términos del recurso hídrico (Vela Enríquez, 2009). La agroforestería se ha convertido en una de las estrategias más populares para la restauración de cuencas hidrográficas. Esta práctica favorece la captación del agua de lluvia, aumenta la tasa de infiltración y garantiza la recarga potencial de los acuíferos con aguas de alta calidad (Sánchez-Galindo et al., 2017). La implementación de la agroforestería adquirió una marcada importancia sobre la gestión del uso de los suelos para mitigar el cambio climático, conservar las relaciones ecosistémicas, restaurar zonas degradadas y áreas naturales (Gassner & Dobie, 2023; Sharry et al., 2022). Los sistemas agroforestales (SAF), como métodos de aprovechamiento de los recursos naturales que integran árboles y arbusto con o sin cultivos y animales (López, 2007). Estos sistemas no solo se destacan como estrategias sostenibles de producción, sino también como potenciales herramientas para la conservación y restauración, contribuyendo al mantenimiento de la funcionabilidad del territorio (López, 2007).

Stadtmüller (1994) menciona que uno de los principales servicios ambientales que proveen los sistemas agroforestales son la conservación del agua, en términos de (cantidad y calidad), puesto que favorece la infiltración y la reducción del escurrimiento superficial, entre otros.

Los SAF pueden estar diseñados basándose en conocimientos empíricos o mediante la aplicación del método científico. Dado que las combinaciones de componentes pueden ser diversas, estos sistemas incorporan tecnologías agroforestales, que son prácticas específicas llevadas a cabo en regiones particulares, como son la implementación de barreras vivas (Tinoco-Rueda et al., 2023). Las barreras vivas (BV) constituyen sistemas a nivel de cuenca que pueden desempeñar un papel fundamental en la recarga de acuíferos. Su funcionamiento se basa en la infiltración del agua, la regulación del flujo hídrico subsuperficial, la recarga y el mantenimiento del acuífero y las aguas subterráneas, el mejoramiento de la calidad del agua, la estabilización del flujo hídrico base, el mejoramiento de la estabilidad de la cuenca y el mantenimiento de su potencial productivo. Sin embargo, en pendientes muy pronunciadas, las BV por sí solas no son

suficientes para reducir la erosión, por lo que se combinan con obras de conservación como los bordos en contorno (Bravo et al., 2005; Harvey et al., 2005; Jiménez et al., 2001)

Como ejemplo de investigaciones previas, está el caso de Tehuacán (Moreno & Casas, 2010) en donde evaluaron los sistemas compuestas de cactáceas columnares con algunas especies de árboles y arbustos, como un enfoque de manejo tradicional para la restauración y preservación de la biodiversidad a nivel paisaje, por tanto, Bravo et al. (2011) establecieron barreras vivas para evaluar su viabilidad como estrategias de restauración del suelo, encontrando correlaciones positivas entre este tipo de sistemas y el suelo, principalmente en la disminución del 80% en el escurrimiento y un aumento del 5-10% en la disponibilidad de agua.

Otro caso de estudio, Osuna-Ceja et al., (2019), en el Altiplano semiárido del centro-norte de México, las barreras vivas al contorno de nopal (*Opuntia spp.*) y leucaena (*Leucocephala glauca*) como alternativa para el control de la erosión e infiltración.

Un estudio reciente realizado en condiciones semiáridas en el estado de Hidalgo, llevado a cabo por Narváez Suárez et al. (2020), destacan los servicios ambientales de un sistema agroforestal con agave pulquero, tales como la captación y control de agua de lluvia, así como la recarga de mantos freáticos, entre otros, sin embargo, este estudio es principalmente descriptivo.

En el año 2020 la Universidad Autónoma Chapingo en conjunto con Grupo Modelo, y el proyecto Aguas Firmes, implementaron obras de conservación de suelo y agua como bordos en contorno, presas de gaviones, barreras de piedra acomodada, cabeceo de cárcavas y cuerpos de agua (artificiales) y barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) en microcuencas del acuífero Calera, Zacatecas, con el objetivo de reducir el escurrimiento superficial, aumentar la infiltración y recargar el acuífero. Asimismo, en el año 2023 se instalaron estaciones meteorológicas en las microcuencas del acuífero para realizar el análisis del balance hídrico. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar la influencia de las barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) en el balance hídrico en dos microcuencas dentro del acuífero Calera, Zacatecas para contribuir a la conservación y gestión sostenible del recurso hídrico. El estudio se centra en dos

microcuencas, el maguey con la presencia de barreras vivas y Pánuco con ausencia de estas.

Esta investigación no solo busca abordar la problemática del abatimiento del acuífero Calera, sino también contribuir al conocimiento sobre la efectividad de las tecnologías agroforestales en la recarga hídrica en zonas áridas y semiáridas, que permita incidir en propuestas de políticas gubernamentales y programas que aseguren la sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico y asegurar la disponibilidad de agua para los ecosistemas, la sociedad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos con el fin de lograr el desarrollo económico y social, garantizando la seguridad alimentaria.

1.1 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1.1.1 Objetivo general

Analizar la influencia de las barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) en el balance hídrico del acuífero Calera, Zacatecas para contribuir a la conservación y gestión del recurso hídrico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar dos microcuencas una con barreras vivas y otra sin ellas, mediante su topografía, uso de suelo y características morfométricas para conocer el comportamiento hidrológico.
- Realizar un balance hídrico mediante la medición de sus componentes en dos microcuencas con presencia y ausencia de barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*), para determinar la infiltración.
- Estimar la infiltración mediante el modelo hidrológico HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), en dos microcuencas con presencia y ausencia de barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) para su comparación con lo obtenido en campo.

1.1.3 Hipótesis

- Las características de topografía, uso de suelo y morfométricas determinarán de manera significativa el comportamiento hidrológico, influyendo directamente en procesos como el escurrimiento superficial, la infiltración y el tiempo de concentración de cada microcuenca.
- La presencia de barreras vivas con nopal en una microcuenca influye en el balance hídrico al reducir la evaporación, aumentar la retención de agua en el suelo, disminuir el escurrimiento superficial, por tanto, incrementar la infiltración, en comparación con la microcuenca sin barreras vivas.
- Los valores estimados de infiltración y recarga potencial mediante el modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) en las dos microcuencas con presencia y ausencia de barreras vivas con nopal, se correlacionan con los obtenidos en campo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Agroforestería

La agroforestería, integran árboles o arbustos perennes con cultivos agrícolas o animales, ya sea en disposiciones espaciales específicas o secuencias temporales planificadas (Sotomayor, 2016; ICRAF, 2000; Young, 1989). Estos sistemas generan sinergias que mejoran la productividad, sostenibilidad y brindan beneficios ambientales y sociales (Sotomayor, 2016). Por otro lado, (Krishnamurthy et al., 2003; Nair, 1997) los describen como la incorporación deliberada de especies leñosas junto a cultivos agrícolas o animales, en mezclas espaciales o secuencias planificadas. Según el Centro Internacional de Agroforestería [ICRAF], (2000), se dividen en dos categorías principales: sistemas simultáneos y sistemas secuenciales, el primero consiste en la combinación de árboles con cultivos o animales en una misma área y periodo, se necesita un adecuado espaciamiento para reducir la competencia por luz, agua y nutrientes y la elección de especies arbóreas se basa en condiciones locales y necesidades agrícolas, en el segundo los cultivos y árboles se alternan en la misma área, los árboles se plantan tras la cosecha de los cultivos para reducir la competencia, además, se eligen especies arbóreas de crecimiento rápido que puedan competir con las malezas. Ejemplos son la mejora del barbecho y la rotación de cultivos.

Por otro parte, Sharry et al. (2022) define agroforestería como ciencia compuesta por el uso de varias técnicas, con la finalidad de alcanzar un manejo óptimo por medio de la interdependencia de los componentes, además, la agroforestería se considera como una alternativa que no solo protege los recursos naturales, sino que también responde a las necesidades de la población.

Para Gassner y Dobie (2022), la agroforestería lo definen como la práctica agrícola sostenible y resiliente que ofrece una gama de beneficios tanto para las personas como para el planeta. Su capacidad para aumentar la productividad, mejorar la calidad ambiental y generar beneficios sociales la convierten en una herramienta valiosa para las futuras generaciones.

Por último, de acuerdo con los nuevos paradigmas y políticas públicas nacionales e internacionales, así como el actual enfoque del Centro Internacional de Agroforestería, se propone la siguiente definición: La Agroforestería es el arte, la cultura y la ciencia cuyo objeto de estudio son los socioecosistemas agrícolas que se basan en la interacción con especies perennes multipropósito, promoviendo la racionalidad ecológica y el bienestar en los territorios (Tinoco-Rueda et al., 2023).

2.2 Sistemas agroforestales (SAF)

En la actualidad, la implementación de la agroforestería ha ganado relevancia en la planificación estratégica del uso del suelo, tanto para mitigar el cambio climático como para conservar las relaciones ecosistémicas y restaurar zonas degradadas y áreas naturales (Gassner y Dobie, 2022). Los Sistemas Agroforestales (SAF) se consideran funcionales y cerrados, ya que generan ganancias adecuadas y presentan bajas pérdidas, lo que los hace auto sostenibles (Casanova et al., 2016).

La integración de los componentes vegetales, animales y otros, creó a los Sistemas Agroforestales (SAF), donde estos elementos interactúan de manera benéfica entre sí (Casanova et al., 2016). En el manejo de los SAF se han aplicado diversas técnicas que contribuyen a mitigar las vulnerabilidades de las condiciones locales (Sharry et al., 2022). Esto ha permitido desarrollar sistemas más sostenibles y reducir el deterioro de los recursos naturales.

Los SAF se han clasificado de diversas maneras, considerando su estructura espacial, la función de sus componentes, los beneficios ambientales, sociales y económicos que generan (Nair et al., 2021). Además, otros autores han propuesto categorías adicionales, como el aprovechamiento de los componentes, la escala productiva y las combinaciones, entre otras (Sharry et al., 2022).

Uno de los sistemas utilizados para obtener servicios ecológicos y prevenir la degradación de los recursos son las barreras vivas (Sharry et al., 2022). Estas se consideran tecnologías agroforestales

Estas se definen como filas simples, dobles o irregulares de plantas nativas o introducidas (Gerencia de Restauración Forestal [GRF], 2018). También se describen como densas

plantaciones de especies exóticas o nativas, diseñadas para reducir la velocidad del flujo de agua y así disminuir el escurrimiento (Sánchez et al., 2017).

2.2.1 Tecnología agroforestal de barreras vivas con nopal

Las funciones ecosistémicas de los sistemas agroforestales con barreras vivas son diversas (Nair et al., 2021), y su utilización contribuyen significativamente a la conservación del medio ambiente, el suelo y el agua. Las barreras vivas desempeñan un papel fundamental en la reducción de la pérdida de suelo al retener las partículas arrastradas por el agua durante el escurrimiento (Gassner y Dobie, 2022). Esto resulta en una mejora en la calidad del agua al permitir que solo fluya el agua y no el suelo erosionado. Además, proporciona estabilidad al suelo al formar una capa protectora en la superficie, lo que reduce los efectos de la erosión hídrica causada por la lluvia.

Las barreras vivas con nopal son consideradas una tecnología agroforestal para zonas áridas y semiáridas, ya que han sido categorizadas y adaptadas a estas condiciones dentro de un sistema de manejo agrícola y son conocidas por su capacidad de retención de agua (Farfán et al., 2024; Tinoco-Rueda et al., 2023)

El nopal, en particular, se destaca como una perenne multipropósito (PEMU), definida como plantas de ciclo perenne, leñosas o no, que se cultivan o mantienen intencionalmente para proporcionar más de una contribución significativa, ya sea en forma de productos o servicios, dentro del sistema agroforestal en el que se encuentran (Tinoco-Rueda et al., 2023; Sharry et al., 2022;).



Figura 1. Definición de Perenne Multipropósito.
Fuente: Tinoco-Rueda et al., 2023

2.3 Agroforestería y los recursos hídricos

El deterioro de los recursos hídricos a nivel global ha sido objeto de estudio desde diversas perspectivas (Analuisa et al., 2018), coincidiendo todas ellas en que la deforestación indiscriminada a lo largo de las cuencas hidrográficas es uno de los principales factores causantes.

Según Blanco (2017) las especies vegetales, desempeñan un papel fundamental en la producción de recursos hídricos, cumpliendo diversas funciones como mejorar la calidad del agua, impedir procesos erosivos, proteger las aguas subterráneas de la contaminación y favorecer la producción de agua.

Por otro lado, la vegetación presente en el suelo tiene una gran influencia en los procesos de escurrimiento e infiltración del agua (Gassner y Dobie, 2023; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2017). Debido a que retiene el agua precipitada, permitiendo su gradual infiltración en el suelo, reduce la erosión de las cuencas y crea macroporos en el suelo (Sánchez et al., 2017).

2.4 Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas se definen como áreas que reciben agua de la precipitación y, mediante el escurrimiento, actúan como colectores de agua (Gaspari et al., 2019). En el contexto de los cambios climáticos, la morfología de las cuencas se ve afectada, lo que altera los procesos de aprovechamiento del agua a través del escurrimiento y la precipitación.

Las cuencas desempeñan diversas funciones, incluyendo servicios ambientales como la absorción de dióxido de carbono y el control de la recarga de aguas (Vásconez et al., 2019). También tienen funciones hidrológicas, influenciando la recarga de flujos de agua superficial y subterránea, y funciones ecológicas al proporcionar refugio para diversas especies de flora y fauna, lo que contribuye a mejorar la calidad del agua.

La caracterización de las cuencas se realiza a través de la morfometría, que describe la forma de la cuenca, el relieve y la red de drenaje (Gaspari et al., 2019). Estudiar estas características es fundamental para desarrollar modelos hidrológicos y comprender el comportamiento de las aguas superficiales, especialmente en el contexto del cambio climático, donde la morfometría es fundamental para diseñar estrategias de mitigación.

La actividad humana ha generado importantes cambios en las cuencas, principalmente debido al crecimiento demográfico y el deterioro de los recursos naturales (Navea, 2017). Por tanto, la conservación de las cuencas hidrográficas es esencial para preservar los recursos hídricos superficiales, así como los acuíferos y las aguas subterráneas.

2.5 Ciclo hidrológico

El recurso hídrico, especialmente el agua dulce, se renueva a través de un ciclo que comprende diversos procesos que determinan su comportamiento y disponibilidad en el tiempo, conocido como ciclo hidrológico (Hervis, 2021). El ciclo hidrológico se define como el movimiento del agua a través de la atmósfera, la biosfera y la litosfera en forma de gas, líquido o sólido, ascendiendo mediante la evaporación y descendiendo a través de las precipitaciones y la escorrentía superficial y subterránea. Se considera un proceso continuo de renovación constante impulsado por la energía solar y gravitacional (Urrutia, 2016).

Además, Vásconez et al. (2019) lo describen como el fenómeno de circulación cerrada del agua a nivel global entre la superficie terrestre y la atmósfera, impulsado por la energía solar, la gravedad y la rotación terrestre. En otras palabras, el ciclo hidrológico representa el recorrido del agua en sus tres estados físicos (sólido, líquido y gaseoso).



Figura 2. Ciclo Hidrológico
Fuente: USGS

2.6 Balance hídrico

Es importante cuantificar el volumen de agua que entra y sale de un sistema, como una cuenca hidrográfica. La lluvia representa la entrada, mientras que el caudal del río es la salida. En este estudio, se empleará el balance hídrico, basado en el principio de conservación de la masa, para determinar el cambio de almacenamiento “ ΔA ” entre las entradas “ E ” y salidas “ S ” (Sokolov & Chapman, 1974).

$$E - S = \Delta A$$

Urrutia (2016), define el balance como la relación entre todos los recursos hídricos que ingresan a una determinada área (ganancias) y los que salen de ella (pérdidas) durante un período de tiempo específico. La ecuación que describe los principios fundamentales del balance hídrico lo establece de la siguiente manera:

$$\Delta S = E - S, \text{ por tanto, } I = P - Q_{sup} - ET$$

Donde E representa las entradas de agua en el sistema hidrológico como la precipitación (P) e infiltración (I), S corresponde a todas las salidas o pérdidas como el escurrimiento superficial (Q_{sup}), evapotranspiración (ET) y ΔS representa el almacenamiento de agua (Urrutia, 2016). Cada una de las variables puede obtenerse mediante métodos directos o indirectos utilizando instrumentos especializados como es el caso de este estudio.

2.6.1 Precipitación

La precipitación es el fenómeno en el que el agua, en forma líquida o sólida, cae de la atmósfera a la superficie terrestre como lluvia, aguanieve, nieve o granizo (Urrutia, 2016; Vásconez et al., 2019). Esta agua puede ser interceptada por plantas, infiltrarse en el suelo o escurrirse por la superficie (Cleves et al., 2016). Los procesos asociados, como la interceptación, evaporación, escurrimiento e infiltración, están influenciados por la intensidad de la lluvia, la temperatura y la vegetación (Oviedo, 2020). La precipitación es la principal fuente de agua en el sistema hidrológico (Musy, 2021).

Una vez que precipita, parte del agua se intercepta, se infiltra en el suelo o llena depresiones en la superficie, lo que se conoce como abstracciones o pérdidas. El agua restante, llamada exceso de precipitación, es la que escurre (Merino Jiménez, 2020).

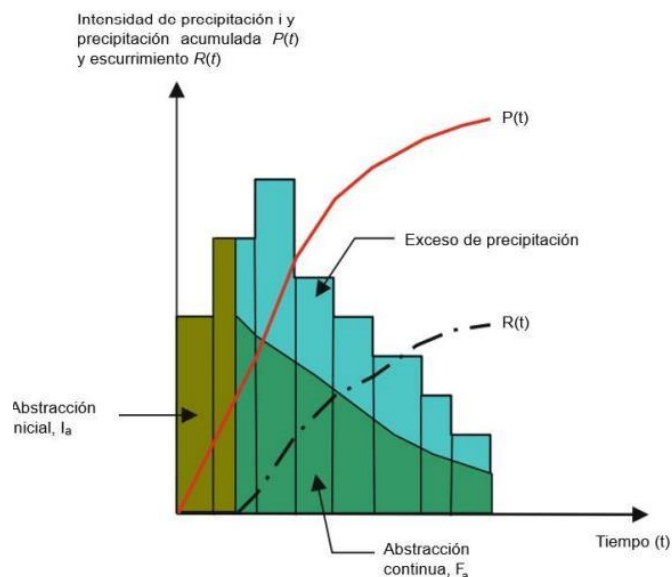


Figura 3. Hietograma con sus principales elementos
Fuente: (Merino Jiménez, 2020)

2.6.2 Escurrimiento Superficial

El escurrimiento, definido como el agua de lluvia que fluye sobre o debajo de la superficie terrestre, llegando a una corriente y siendo drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2018), se produce cuando el suelo alcanza su capacidad máxima de retención de agua, lo que provoca la saturación de los poros del suelo y el flujo del agua, tanto superficial como subterráneo, hacia las zonas de drenaje, sin embargo, el agua puede recargar los acuíferos y alimentar cuerpos de agua (Oviedo, 2020; Mace, 2023).

Para estimar el escurrimiento superficial generada por un evento de lluvia en cuencas sin aforo se emplea el método número de curva desarrollado por el Departamento de Agricultura de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés), este método se describe detalladamente en el Manual Nacional de Ingeniería (SCS, 2004). Es un método conceptual reconocida por su simplicidad, predictibilidad y estabilidad, ampliamente utilizado en Estados Unidos y otros países, para estimar los escurrimientos directos a partir de las precipitaciones. Este método se basa en un único parámetro, el número de curva de escurrimiento (CN), el cual depende de las características físicas de la cuenca, como el grupo hidrológico del suelo (A, B, C y D), el uso y tipo del suelo, la condición de la superficie (pobre, regular y buena) y las condiciones de humedad antecedente (Ponce & Hawkins, 1996).

2.6.3 Evapotranspiración

La evaporación se define como el proceso mediante el cual el agua que se encuentra dentro del suelo se transforma de estado líquido a gaseoso (Vásconez et al., 2019). Por otro lado, la transpiración hace referencia al vapor de agua liberado por las especies vegetales hacia la atmósfera. La combinación de estas pérdidas físicas (evaporación) y biológicas (transpiración) resulta en un proceso conocido como evapotranspiración, que implica la vaporización del agua tanto de cuerpos de agua y superficies como de las plantas (Urrutia, 2016). Este proceso se divide en dos categorías: la evapotranspiración potencial, que representa la cantidad máxima de agua que podría evaporarse del suelo con vegetación en condiciones óptimas y sin restricciones de agua (González et al., 2021) considerada en el presente estudio de manera directa y estimada, y la evapotranspiración real, que, a diferencia de la anterior, tiene en cuenta las limitaciones de agua.

2.6.4 Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua se mueve desde la superficie del suelo hacia el interior de este, impulsada por la gravedad y las fuerzas capilares (Aparicio, 2018), sin embargo, la percolación ocurre cuando el agua infiltrada se desplaza a través del suelo, es decir, únicamente cuando el suelo está saturado (Merino, 2020).

Estos procesos permiten que el agua de lluvia penetre en el suelo y se desplace hacia capas más profundas (Urrutia, 2016). Son esenciales para controlar las aguas subterráneas, ya que el suelo retiene y devuelve parte del agua a la atmósfera mediante la evaporación (Oviedo, 2020). Las raíces de las plantas también contribuyen al ciclo al devolver agua a la atmósfera a través de la transpiración. El agua que no se evapotranspira puede recargar los acuíferos (Gerencia de Restauración Forestal [GRF], 2018).

2.7 Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico es una expresión matemática que representa el ciclo del agua en una región específica, con el fin de convertir la lluvia en escurrimiento (Clark, 2011). Teniendo como objetivo simplificar la complejidad del entorno real al seleccionar los

aspectos fundamentales que influyen en el funcionamiento del sistema hidrológico modelado.

Por otro lado, Urrutia (2016) define los modelos como representaciones que describen las relaciones entre los elementos hídricos, sus respuestas y su proyección en una modelación. Permitiendo visualizar las consecuencias de eventos específicos al ingresar información sobre los parámetros relacionados en una cuenca hidrográfica.

Por último, Hervis (2021), menciona que los modelos representan todos los procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica, abordando directamente la interacción entre la contribución climática, a nivel atmosférico y energético. Los modelos hidrológicos describen los componentes esenciales del sistema e intentan replicar las características de las cuencas reales con cierta similitud.

Los cambios en el ciclo hidrológico pueden ser analizadas mediante modelos hidrológicos (Gayathri et al., 2015). Actualmente, existen diversos tipos de modelos que permiten estudiar los efectos del clima y los cambios en el uso del suelo sobre los recursos hídricos. Una gran ventaja de los modelos hidrológicos es su capacidad para estimar eventos a largo plazo en un período de tiempo considerablemente corto (Urrutia, 2016), lo que contribuye a la planificación estratégica para el manejo sostenible de los recursos hídricos (Hervis, 2021).

Además, los modelos hidrológicos permiten simular la dinámica entre los diferentes elementos del balance hídrico, como los usos del suelo, las características del suelo y los flujos de una cuenca (Aguayo et al., 2016). Su implementación representa un avance significativo, ya que facilita la toma de decisiones gracias a su rapidez en proporcionar resultados y su bajo costo (Urrutia, 2016), en este estudio se implementará el modelo hidrológico HEC HMS para una zona semiárida para eventos de lluvia del año 2023.

2.8 Modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un software de modelación hidrológica no semidistribuido (Prado-Hernández, 2019) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU (Felman, 2000), diseñado

para simular los procesos de precipitación-escorrentamiento de cuencas hidrográficas. El programa permite resolver diversos problemas relacionados con la hidrología, incluyendo inundaciones, suministro de agua en grandes cuencas y producción de escorrentías (US Army Corps of Engineers [USACE], 2021).

Los hidrogramas de escorrentía generados por HEC-HMS se pueden utilizar directamente o en conjunto con otros programas para realizar estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de caudales, evaluación del impacto del cambio de uso del suelo, diseño de obras hidráulicas y reducción de daños por inundaciones (Scharffenberg et al., 2018).

2.9 Literatura citada

- Aguayo, M., Stehr A., y Link O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista Geografía Norte Grande*, 197-214 ISSN-e: 0718-3402.
- Alvarado Acevedo, J. F., Arévalo Hernández, J. E., & Lobo Medrano, J. A. (2020). Diagnóstico y propuesta de un plan de manejo integral de la cuenca hidrográfica del río Las Cañas (Master's thesis, UNICAES Editorial).
- Analuisa, I., Moreira, G., Medina, D., y Muñoz, J. (2018). Reforestación de las cuencas hídricas del sitio Mosquito. *Revista San Gregorio*, 28: 26-35. eISSN: 2528-7907
- Aparicio, F. (2018). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. México, DF.
- Bettoni, M., Maerker, M., Bosino, A., Conedera, M., Simoncelli, L., & Vogel, S. (2023). Land use effects on surface runoff and soil erosion in a southern Alpine valley. *Geoderma*, 435, 116505.
- Blanco, J. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2): 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01.
- Bravo, M., Ruíz, J y Volke, V. (2005) Cultivo de maíz en sistemas de labranza con barreras biofísicas en andosoles de ladera. *Terra Latinoamericana*, 23(3): 371-380. Chapingo, México.
- Bravo, M., Trinidad, J., Barrera, G., Medina, L., Mendoza, M. Prat, C. y García, F. (2011) Tecnologías agroecológicas para la restauración de suelos degradados en la subcuenca de Cointzio, Michoacán. Folleto técnico num. 28, INIFAP. ISBN 978-607-425-701-4
- Carrillo, C. J., Álvarez, G., Aguilar, G., Can, A., y Pinedo, J. (2021). Calidad del agua para riego agrícola en la región del acuífero Calera en Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2): 01-58. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-02-01.

- Casanova, F., Ramírez, L., Parsons, D., Caamal, A., Piñeiro, A. T., y Díaz, V. (2016). Environmental services from tropical agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269-284. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.029.
- Clark, D. B., Mercado, L. M., Sitch, S., Jones, C. D., Gedney, N., Best, M. J., Pryor, M., Rooney, G. G., Essery, R. L. H., Blyth, E., Boucher, O., Harding, R. J., Huntingford, C., y Cox, P. M. (2011). The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, *Geosci. Model Dev.*, 4, 701-722
- Cleves, J., Toro, J., y Martínez, L. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1): 149-163. Doi: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>
- Comisión Nacional del Agua, (México) (2020). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Calera (3225), estado de Zacatecas, edición 2020, Comisión Nacional del Agua.
- Escolero, O., Gutiérrez, C., & Mendoza, E. (2017). Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89), 193-219. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008&lng=es&tng=es
- Farfán Gutiérrez, M., Vargas Rodríguez, L., y Godbert, Y. (2024). Barreras vivas de nopal y agave: un escudo natural contra incendios forestales. *Revista Digital Universitaria (rdu)*, 25(4). <http://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2024.25.4.10>
- Felman, A. D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual (A. D. Felman, ed.). Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., y Montealegre, M. A. (2019). Capítulo 3: Definición de cuenca hidrográfica y morfometría. En F. J. Gaspari, A. M. Rodríguez, y M. A. Montealegre, *Manejo de cuencas hidrográficas* (págs. 35-69). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. ISBN: 978-950-34-1833-8.
- Gassner, A., y Dobie, P. (2023). Agroforestería: una guía. Principios de diseño y manejo agroforestal en beneficio de las personas y del medioambiente. Bogor, Indonesia: Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR); Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) 14–23. <https://doi.org/10.5716/cifor-icraf/BK.33141>.
- Gayathri, K., Ganasri, B. P., y Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4: 1001-1007. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126.

- Gerencia de Restauración Forestal [GRF] (2018). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales*. Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 1-298.
- Girón Méndez, P. (2022). *Modelación hidrológica en la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).
- Gonzalez, G., Ríos, N., Benegas, L., y Argotty, F. (2021). Impact of the climate change and the land use/land cover change in the hydrological and water erosion response in the Quiscab River subbasin. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 363-421. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-09.
- Harvey, C., Villanueva, C., Villacís, J., Chacón, M., Muñoz, D., López, M., Ibrahim, M., Gómez, R., Taylor, R., Martinez, J., Navas, A., Saenz, J., Sánchez, Medina, A., Vilchez, S., Hernández, B., Perez, A., Ruiz, F., López, F., Lang, I., Sinclair, F. (2005) Contribution of live fences to the ecological integrity of agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111: 200230.
- Hervis, G. (2021). Estimación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga potencial del agua subterránea actual y futura en el acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro. Universidad Autónoma del Estado de México, 1-214.
- Hosseini, M. and Ashraf, M.A., (2015). Application of the SWAT Model for Water Components Separation in Iran. In: M.H.a.M.A. Ashraf (Editor), *Application of the SWAT Model for Water Components Separation in Iran*. Springer Hydrogeology, Japan, pp. 1-32.
- ICRAF (2000). *Paths to Prosperity through Agroforestry*. ICRAF's Corporate Strategy, 2001-2010. Nairobi: International Centre for Research in Agroforestry.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Glosario. En T. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, P. Midgley, *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (págs. 185-204). Cambridge University Press.
- Jiménez, F., Muschler, R., & Köpsell, E. (2001). *Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Krishnamurthy, L., K. Krishnamurthy, I. Rajagopal y A. Arroyo (2003). *Introducción a la agroforestería para el desarrollo rural*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 105 pp.
- 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
- López, T. G. (2007). *Sistemas agroforestales*. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Post-graduados. Puebla, 8.

- Mace, R. E. (2023). Groundwater Sustainability Conception, Development, and Application palgrave studies in environmental sustainability.
- Mekonnen, Y. A., & Manderso, T. M. (2023). Land use/land cover change impact on streamflow using Arc-SWAT model, in case of Fetam watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 13(5), 111.
- Merino Jiménez, E. (2020). *Modelación hidrológica horaria en la cuenca del Río Fuerte* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).
- Monterroso, A., y López, L. (2022). Agroforestería en la adaptación y mitigación. En J. M. Palma, J. A. Torres, y E. Valdés, *Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático* (págs. 13-33). México: Universidad de Colima, 1-291 DOI: 10.53897/LI.2022.0011.UCOL.
- Moreno, A. y Casas, A. (2010). Agroforestry systems: restoration of semiarid zones in the Tehuacán valley, in central México. *Ecological Restoration*, 28(3): 361368
- Mosquera, M. R., Ferreiro, N., Santiago, J. J., Fernández, E., y Rigueiro, A. (2018). *Los sistemas agroforestales como forma de gestión en la adaptación al cambio climático*. Land use policy, ISBN: 978-84-491-0038-3, pp.538-588.
- Musy, A. 2001. Cours "Hydrologie générale". Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement.
- Nair, P. R., Kumar, B. M., y Nair, V. D. (2021). An Introduction to Agroforestry-Four Decades of Scientific Developments. Cham: Springer International Publishing, 21-28.
- Nair, P.K. 1997. Agroforestería. Universidad Autónoma Chapingo. México. 543 pp
- 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.
- Navea, J. (2017). Acciones Ambientalistas para la Conservación de las Cuencas Hidrográficas. *Revista Scientific*, 2(6): 134-158. DOI: <https://doi.org/10.29394/scientific.issn.2542-2987.2017.2.6.7.134-153>
- Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2017). Agroforestería para la restauración del paisaje. Roma, Italia. Consultada en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/4c40fe3e-df0b479a-8c75-bb4877a4d4e8/>.
- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Gamiño, M. Á., & Pimentel-López, J. (2019). Un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(SPE22), 89-103.
- Oviedo, L. M. (2020). *Variaciones de la recarga de agua subterránea bajo escenarios de cambio climático en el nivel somero del sistema acuífero bajo cauca antioqueño*. Universidad Nacional de Colombia, 1-102.

- Palacios-Vélez, Ó. L., & Escobar-Villagrán, B. S. (2016). La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 5-16.
- Pinilla Mendoza, A. M. (2023). Impacto de los cambios en el uso del suelo sobre el balance hídrico en zonas de llanura (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdés, R., Olivares, C., & Balocchi, F. (2010). Evaluación de la Erosión Hídrica Superficial en zonas áridas y Semiáridas de Chile Central. *Aqua-Lac*, 2(2), 1-11.
- Ponce, V. M., y Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1996)1:1(11))
- Prado-Hernández, J. V., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., Valentín Paz, O. G., Carrillo-García, M., Martínez-Ruiz, A., & Sánchez-Morales, J. J. F. (2019). Application of the HEC-HMS and IBER in the numeric modeling of floods in the rio San Sebastian of the municipality of Totolapan, Morelos, México. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 239, 263–274. <https://doi.org/10.2495/WS190231>
- Rivas, E. R., Veyna, Ó. P., & Bernal, L. E. P. (2020). Elementos de productividad agrícola en áreas de riego de Zacatecas. *Memoria Universitaria*, 3(1).
- SACE. (2021). HEC-HMS User's Manual Versión 4.8. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.8/preface>
- Sánchez, M., Fernández, D., Martínez, M., Rubio, E., y Ríos, J. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5): 141-156. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-05-10.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). Hydrologic modeling system (HEC-HMS): User's manual Version 4.3. Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC).
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, (34-35), 13-30.
- Sharry, S., Stevani, R. A., y Galarco, S. P. (2022). Los Sistemas Agroforestales. En S. Sharry, *Los Sistemas Agroforestales*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, 11-59.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1974). Methods for water balance computations.
- Sotomayor, A. (2016). Introducción a los sistemas agroforestales y las interacciones entre sus componentes en A. Sotomayor y S. Barros (Eds.) *Los Sistemas Agroforestales en Chile* (Cap 1. pp. 09-56). Instituto Forestal. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/21189>

- Stadmüller, T. (1994). Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo (Revisión bibliográfica). Turrialba, Costa Rica, CATIE-COSUDE. 62 p. (Serie técnica, Informe técnico no. 246).
- Tinoco-Rueda, J.A., Valdés E., & Escamilla, E. (2023). Conceptos de agroforestería, nuevos paradigmas bajo el enfoque de agricultura multifuncional para el desarrollo sostenible. Centro Regional Universitario Oriente, Universidad Autónoma Chapingo.
- Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 2019a. Estimación para la recarga del acuífero Calera (3225), Zacatecas. Fase de Caracterización.
- Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 2019b. Estimación para la recarga del acuífero Calera (3225), Zacatecas. Fase de Diagnostico.
- Urrutia, M. A. (2016). Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del Rio San Juan bajo la influencia de la actividad minera. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 1-98.
- US Army Corps of Engineers [USACE]. (2021). Hydrologic Modeling System, HEC-HMS. Quick Start Guide Version 4.12. Davis, CA, USA: Institute for Water Resources, Hydrological Engineering Center
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., y Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*. Universidad Politécnica Salesiana, 1-136.
- Vela Enríquez, M. E. (2009). Potencialidades de pago del servicio ecosistémico hídrico en sistemas agroforestales, en áreas prioritarias de abastecimiento de agua para consumo humano en la cuenca alta del río Bobo, Nariño, Colombia.
- Vélez, A., Padilla, L., y Mojarro, F. (2015). Disponibilidad para ahorrar agua de uso agrícola en México: caso de los acuíferos de Calera y Chupaderos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2):277-290. ISSN e-2007-9230.
- Young, A. (1989). The environmental basis of agroforestry. Meteorology and Agroforestry, ICRAF, Nairobi, Kenya, 29-48.

3 CARACTERIZACIÓN DE DOS MICROCUENCAS DENTRO DEL ACUIFERO CALERA, ZACATECAS

3.1 Resumen

El análisis de los procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas es fundamental debido a la limitada disponibilidad de agua. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la morfometría, la topografía y la cobertura del suelo en dos microcuencas del acuífero Calera, Zacatecas, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y percepción remota. Se aplicó el algoritmo de clasificación supervisada Máquinas de Soporte de Vectores (SVM), obteniendo valores de Kappa cercanos a 1. La metodología incluyó el procesamiento de un Modelo de Elevación Digital (DEM) para la delimitación de las microcuencas y el análisis de parámetros morfométricos, como área, longitud, forma, relieve, curva hipsométrica, red hidrológica y tiempo de concentración. Además, se utilizaron imágenes Sentinel-2A para la clasificación supervisada de la cobertura del suelo. Los resultados indicaron que ambas microcuencas presentan formas alargadas, con valores de 0.20 y 0.18, respectivamente, El Maguey presentó una mayor superficie (12.73 km²) en comparación con Pánuco (11.26 km²), aunque ambos tienen perímetros similares (17.73 km y 17.58 km, respectivamente). Sin embargo, Pánuco presentó pendientes más pronunciadas tanto en la pendiente media de las microcuencas (P_{mcue}) de 1.69% como la del cauce principal (P_{mc}) de 3.88%, en comparación con El Maguey 1.40% y 1.81%, respectivamente, lo que indica una respuesta hidrológica más acelerada y un mayor potencial de erosión. Por otro lado, la presencia de barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) en El Maguey podría favorecer la retención de humedad y la estabilidad del suelo. Estos hallazgos proporcionan información relevante para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

Palabras claves: morfometría, SIG, cobertura del suelo, escurrimiento, respuesta hidrológica

Tesis de maestría en ciencias, Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Deyanira Quiterio Medel

Director: Dr. David Cristóbal Acevedo

CHARACTERIZATION OF TWO MICRO-WATERSHEDS WITHIN THE CALERA AQUIFER, ZACATECAS

3.2 Abstract

The analysis of hydrological processes in arid and semi-arid zones is fundamental due to the limited availability of water. This study aimed to characterize the morphometry, topography, and land cover in two micro-watersheds of the Calera aquifer, Zacatecas, using Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing. The supervised classification algorithm Support Vector Machines (SVM) was applied, obtaining Kappa values close to 1. The methodology included the processing of a Digital Elevation Model (DEM) for the delineation of the micro-watersheds and the analysis of morphometric parameters, such as area, length, shape, relief, hypsometric curve, hydrological network, and concentration time. Additionally, Sentinel-2A images were used for the supervised classification of land cover. The results indicated that both micro-watersheds exhibit elongated shapes, with values of 0.20 and 0.18, respectively. El Maguey presented a larger area (12.73 km²) compared to Pánuco (11.26 km²), although both have similar perimeters (17.73 km and 17.58 km, respectively). However, Pánuco presented steeper slopes both in the average slope of the micro-watersheds (P_{mcue}) of 1.69% and that of the main channel (P_{mc}) of 3.88%, compared to El Maguey 1.40% and 1.81%, respectively, indicating a more accelerated hydrological response and a greater potential for erosion. On the other hand, the presence of living barriers with nopal (*Opuntia* spp.) in Maguey could favor moisture retention and soil stability. These findings provide relevant information for the sustainable management of water resources in the región.

Keywords: morphometry, GIS, land cover, runoff, hydrology

Master's Degree Thesis in Agroforestry, Graduate Program in Agroforestry for sustainable development,
Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Deyanira Quiterio Medel
Advisor: Dr. David Cristóbal Acevedo

3.3 INTRODUCCIÓN

En zonas áridas y semiáridas, donde la disponibilidad del recurso hídrico es limitada, comprender los procesos hidrológicos de una unidad hidrográfica (cuenca, subcuenca y microcuenca) es fundamental (Del Águila & Mejía, 2021). La caracterización morfométrica (Zanandrea et al., 2024; Hernández & Manzo, 2022) proporciona una base sólida para evaluar la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación (Mahala, 2020; Hurtado et al., 2013;). Asimismo, el análisis de la topografía y la cobertura del suelo (Mekonnen & Manderson, 2023) son indicadores biofísicos importantes para evaluar aspectos ecológicos y territoriales que incluyen elementos naturales y aquellos modificados por las actividades humanas (Guzmán et al., 2023).

El análisis morfométrico es una herramienta fundamental para cuantificar y evaluar la forma, estructura y extensión de una unidad hidrográfica. Este enfoque permite comprender cómo las características físicas del terreno, como la pendiente, la densidad de drenaje y la forma de la cuenca, influyen en los patrones de flujo hídrico (Asfaw & Workineh, 2019). Estudios recientes han demostrado la importancia de esta relación para abordar problemas como la erosión del suelo (Arabameri et al, 2020), las inundaciones (Jothimani et al, 2021) y la escorrentía superficial (Sakthivel et al, 2019). Además, factores como la cobertura del suelo desempeñan un papel fundamental en los procesos hidrológicos, principalmente en los canales de drenaje, al favorecer la infiltración, amortiguar el impacto de las precipitaciones y reducir la escorrentía superficial (Silva et al., 2022).

Estos análisis son clave para estimar la infiltración y el escurrimiento superficial, así como para comprender la producción y el transporte de sedimentos, estos aspectos no solo contribuyen a la conservación de los recursos naturales, sino que también son esenciales para el funcionamiento integral del sistema hidrológico y para el desarrollo de modelos hidrológicos efectivos (Méndez-Gutiérrez et al., 2021; Mahala, 2020; Chandhiha & Kansal, 2017).

En la actualidad, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (PR), validadas con trabajo de campo, ha facilitado el análisis

morfométrico, la topografía y la cobertura del suelo (Méndez-Gutiérrez et al., 2021). Estas herramientas permiten procesar y visualizar datos para cuantificar los atributos de una unidad hidrográfica (Medeiros et al., 2019) mediante la aplicación de índices y métodos propuestos por autores como Témez (1978), Horton (1945, 1932), Miller (1975), Strahler (1964) y Gravelius (1914). Diversos estudios (Gutiérrez et al., 2019; Faye, 2018; Banerjee et al., 2017; Rai et al., 2017; Bogale, 2021) han demostrado que los SIG son una herramienta eficaz y fundamental en estudios hidrológicos.

Por otra parte, el análisis de la cobertura del suelo requiere técnicas avanzadas para el levantamiento de datos espaciales con alta precisión (Borrás et al., 2017). Entre estas, el algoritmo de clasificación supervisada MSV destaca por su capacidad de discriminar diferentes categorías de cobertura con gran exactitud, permitiendo diagnósticos más fiables y detallados (Murillo, 2021).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la morfometría, la topografía y la cobertura del suelo de dos microcuencas ubicadas dentro del acuífero Calera, Zacatecas mediante aplicación de sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota para conocer su comportamiento hidrológico.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio

El acuífero Calera, ubicado en la porción oriental del estado de Zacatecas, México (Figura 1) entre las coordenadas 22°41' y 23° 24' de latitud, y entre 102°33' y 103° 01' de longitud, abarca una superficie de aproximadamente 2,226 km² (Hernández et al., 2012). Está en una cuenca cerrada donde los cuerpos de agua son arroyos no perennes, lo que significa que no hay grandes ríos ni reservorios importantes en la zona de estudio (Núñez et al., 2004).

La altitud del acuífero Calera varía entre los 600 y 2000 msnm. Su formación incluye unidades de origen volcánico de la Sierra Madre Occidental, así como materiales aluviales y lacustres como arcilla, limo, arena y grava cementados con arcilla calcárea. La litología de la región comprende rocas ígneas, calizas, dolomitas y rocas metamórficas

fracturadas debido a movimientos tectónicos (Dávila et al., 2012). El grupo de suelo predominante es el castañozem lúdico, resultado del transporte de material aluvial que caracteriza la región (INEGI, 2014).

Según la clasificación de Köppen, adaptada por Enriqueta García, la mayor parte del acuífero tiene un clima semiseco templado BS1kw. Con una precipitación anual promedio de 425 mm y una evaporación de alrededor de 2,263 mm al año (CONAGUA, 2018).

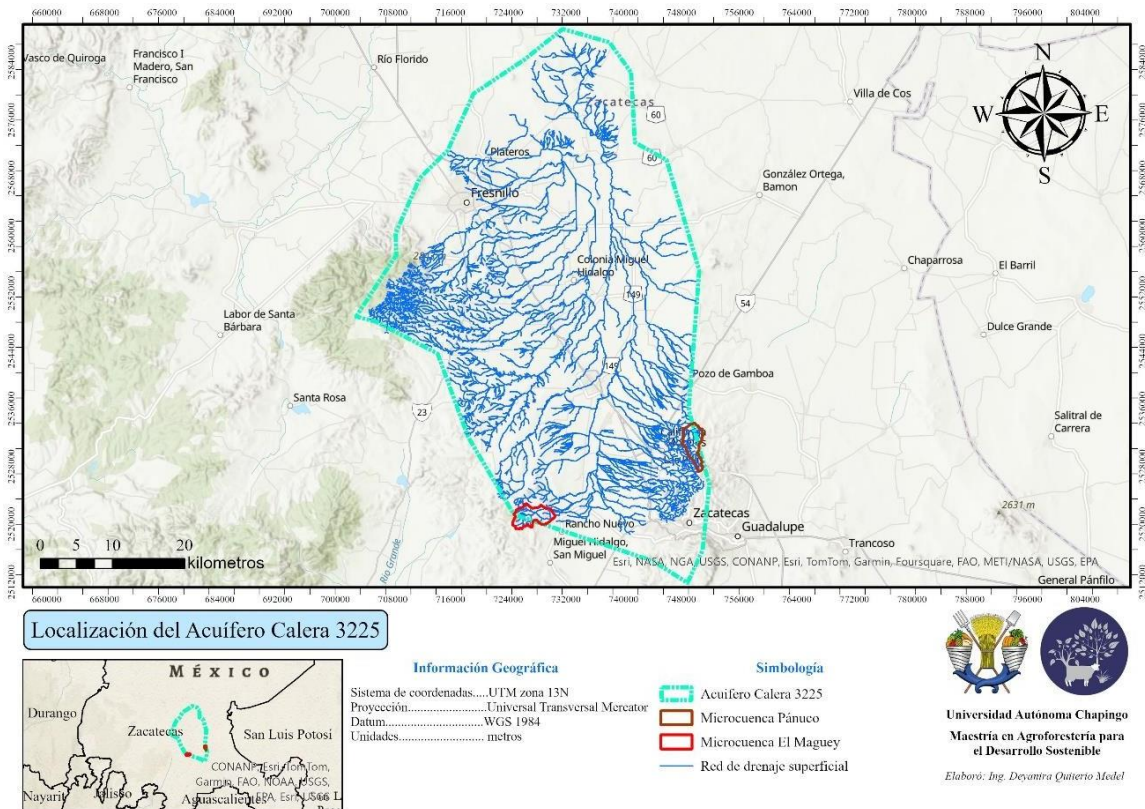


Figura 1. Localización del sitio de estudio

3.4.2 Microcuencas de estudio

Utilizando el software ArcGIS pro como herramienta de SIG se procesó un modelo de elevación digital (DEM) de resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m obtenido de sitio oficial <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>. El DEM se proyectó al sistema de referencia espacial UTM en zona 13 N y se recortó con la capa vectorial del sitio de estudio. Posteriormente, se realizó el proceso de manera automatizado de la delimitación de las microcuencas mediante un *Model Builder*, asimismo, se definieron las corrientes de la red de drenaje superficial y el orden del número de corrientes (Figura 2).

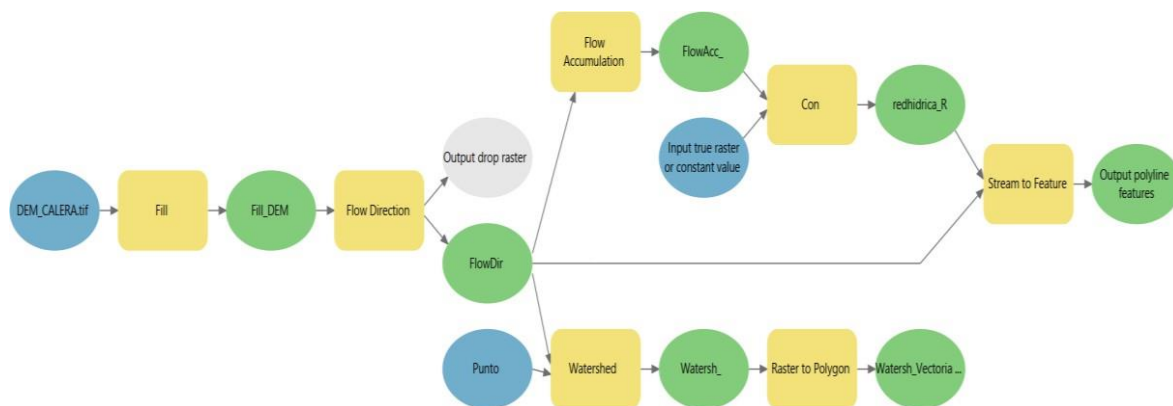


Figura 2. Modelo para delimitar microcuenca en ArcGIS pro

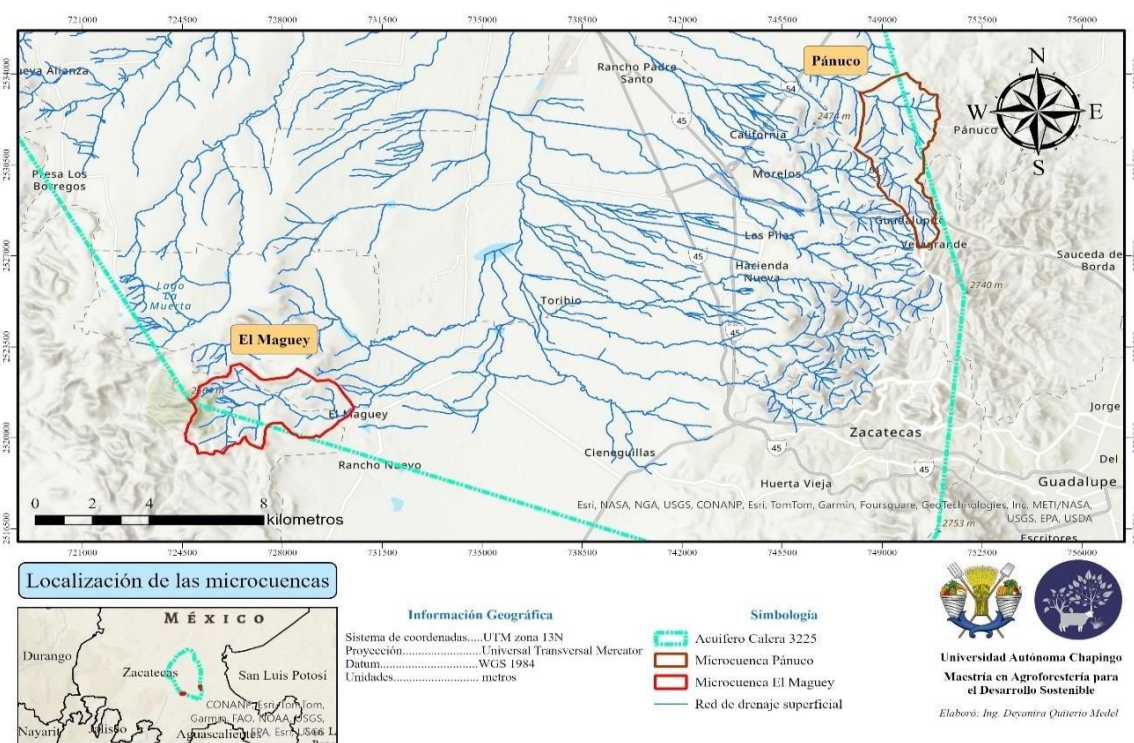


Figura 3. Localización de las microcuencas

El análisis morfométrico proporciona información detallada y sistemática sobre la cuenca de drenaje. En el Cuadro 1 se presentan los parámetros utilizados en este estudio, incluyendo los relacionados con el área y la longitud, la forma, el relieve, la red de drenaje, el tiempo de concentración y el coeficiente de rugosidad de Manning.

Cuadro 1. Fórmulas para el cálculo de parámetros morfométricos en cuencas

Categoría	Parámetro	Fórmula y Descripción	Referencia
Área y Longitud	Área (A) km ²	Área total de aportación de la cuenca	(Sánchez et al., 2003; Horton, 1945)

Categoría	Parámetro	Fórmula y Descripción	Referencia
Forma	Perímetro (P) km	Longitud de la línea divisora	(Schumm, 1956)
	Longitud del cauce principal (L _c) km	Longitud del cauce principal desde su origen hasta el punto de aforo	(Cruz-Romero et al., 2015)
	Longitud total de las corrientes (km)	Longitud total de los cauces en la red de drenaje	(Horton, 1945)
	Índice de forma (I _f)	$I_f = \frac{A}{Lb^2}$	(Horton, 1932)
	Coeficiente de compacidad (C _c)	$C_c = \frac{0.28 * P}{\sqrt{A}}$	(Gravelius, 1914)
	Relación de circularidad (R _c)	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	(Miller, 1953)
	Proporción de elongación (P _e)	$P_e = \frac{2 * \sqrt{A}}{Lc} \pi$	(Schumm, 1956)
Relieve	Altura media de la cuenca (m)	Altura medida en el 50% del área acumulada $D * L$	
	Pendiente media de la cuenca (P _{mcue}) %	$P_{mcue} = \frac{D}{A}$ D= Desnivel entre curvas de nivel (km) L= Longitud total de las curvas (km)	(Horton, 1932)
	Pendiente media del cauce principal (P _{mc}) %	$P_{mc} = \frac{C_2 - C_1}{L_c} (100)$ C2= Cota del punto más alto (m) C1= Cota del punto más bajo (m)	(Becerra, 2005)
	Orden de corrientes (u)	Orden jerárquico	(Strahler, 1964)
Red hidrológica	Número de cauces (Nu)	Orden jerárquico	(Horton, 1945)
	Densidad hidrográfica (D _h) L/km ²	$D_h = \frac{N_c}{A}$ Nc= Número de corrientes	(Horton, 1945)
	Densidad de drenaje (D _d) km/km ²	$D_d = \frac{Lc}{A}$	(Horton, 1945)
	Relación de bifurcación (R _b)	$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	(Schumm, 1956)
	Tiempo de concentración (t _c)	$t_c = 0.000054088 \frac{Lc^{1.27}}{H^{0.5}}$ Lc= Longitud del cauce principal (m) H= Desnivel del cauce principal (m)	(Kirpich, 1940)
	Coeficiente de rugosidad		(Chow, 1994).

3.4.3 Clasificación supervisada

Pre-procesamiento

Las clasificaciones se realizaron a partir de imágenes Sentinel 2^a adquirida del Copernicus Open Acces Hub (ESA, 2020) del sitio oficial <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> con fecha 11 de octubre y 22 de noviembre de 2023 con una resolución espacial de 10 metros, se utilizó la capa de datos vectoriales de vegetación de INEGI serie VII 1:250 000 para reconocer algunas clases mediante la interpretación visual, asimismo, para el reconocimiento de coberturas se utilizó el método propuesto por Chuvieco (2010) y combinaciones de bandas (Delegido et al., 2016). Las clases de coberturas fueron cuerpo de agua, bosque, pastizal, matorral, vegetación de galería, suelo desnudo (minas), zona agrícola y zona urbana.

Procesamiento

Las áreas de entrenamiento se crearon a partir de información de puntos obtenidos en la fase de muestreo de campo y por fotointerpretación de las imágenes de alta resolución. Se seleccionaron aleatoriamente 1000 muestras distribuidas en todas las clases para comparar y evaluar la precisión temática entre los resultados de la clasificación automática y la imagen de alta resolución. De estas, 500 muestras (50%) fueron utilizadas como puntos de entrenamiento para los algoritmos de clasificación, mientras que las otras 500 muestras se destinaron a la validación de los resultados obtenidos.

Se aplicó el clasificador Maquinas de soporte de Vectores (SVM), las características están descritas por Adankon & Cheriet (2015) y Richards & Richards (2022), se calcularon las distribuciones de probabilidad para las distintas coberturas, aplicando el teorema de Bayes para determinar la probabilidad de que un píxel pertenezca o no a una clase de cobertura específica (Congedo, 2018).

La selección de las muestras para el entrenamiento y la validación del algoritmo de clasificación se basó en datos de campo (Campos-Taberner et al., 2020). Para la validación, se asignaron 500 puntos. Una vez elegidas las muestras para el entrenamiento y la validación, se localizaron sobre las imágenes satelitales, permitiendo asociar cada píxel con las clases de cobertura del suelo identificadas en el terreno.

Además, se aplicó el algoritmo de clasificación correspondiente para cada tipo de imagen satelital.

Post-procesamiento

Para la precisión se empleó una matriz de confusión para comparar la información obtenida de los sitios de muestreo con la imagen clasificada (García-Mora y Mas, 2008). Por último, se aplicó el coeficiente de kappa para evaluar la concordancia estadística de la matriz, conforme al método propuesto por Landis & Koch (1977).

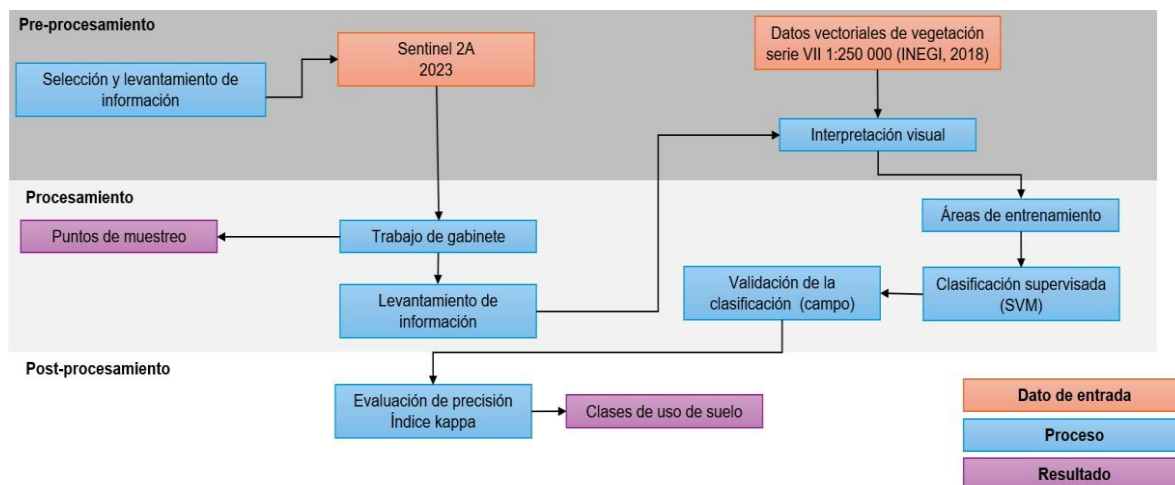


Figura 4. Diagrama para la clasificación supervisada

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis morfométrico de una cuenca es fundamental para comprender su dinámica hidrológica y la interacción del agua con factores como el suelo, la topografía y la cobertura vegetal (Mani et al., 2022). Además, las características físicas permiten evaluar su respuesta ante eventos de precipitación (Lux, 2016), dado que existe una relación directa entre la morfometría y la generación del escurrimiento superficial (Marzo-Manuel & Gómez-Luna, 2024). Investigaciones realizadas en la cuenca de la Paz, Baja California Sur, México (Flores, 2012), en la cuenca el Salto, Durango (Méndez-Gutiérrez et al., 2021) y en sistemas hidrológicos altoandinos de Perú (Ortiz-Vera, 2015) han demostrado esta relación destacando la influencia de los parámetros morfométricos en el comportamiento hidrológico y la generación de caudales lo que resulta importante para la gestión de los recursos hídricos.

3.5.1 Análisis morfométrico

Área y longitud

En el cuadro 2 se puede observar que las microcuencas presentan áreas similares, siendo El Maguey más grande con una superficie de 12.73 km² y Pánuco de 11.26 km², lo que sugiere una mayor capacidad de captación de agua. sin embargo, sus perímetros son similares (17.73 km y 17.58 km, respectivamente). Mekonnen y Manderson (2023) afirman que las cuencas con mayor superficie tienden a generar mayores volúmenes de escurrimiento superficial en condiciones de lluvias intensas. Sin embargo, en este caso, la diferencia de tamaño entre las microcuencas no parece ser un factor determinante para el escurrimiento, debido que incluye otros factores como la topografía, el grupo de suelo y cobertura vegetal, y, por lo tanto, en la evapotranspiración, erosión, escurrimiento superficial, almacenamiento e infiltración (Campos-Aranda, 1998). Por otro lado, Bashir y Alsalman (2024) argumentan que, aunque las cuencas puedan tener áreas y perímetros similares, sus respuestas hidrológicas pueden ser diferentes, dado que éstas dependen de factores como el tiempo de concentración. En este caso, El Maguey tiene un tiempo de concentración (t_c) de 24.24 minutos, mientras que Pánuco tiene un t_c de 16.44 minutos. Este hallazgo es consistente con los resultados de Lux (2016) y Esper-Angillieri y Perucca (2014), quienes reportaron valores similares, indicando que las cuencas con tiempos de concentración menores son más susceptibles a generar crecidas rápidas y de corta duración.

Forma

En cuanto a los parámetros que definen la forma, ambas microcuencas tienen valores de índice de forma (I_f) cercanos a cero, el Maguey resultó en 0.20 y Pánuco con 0.18, lo que indica que sus formas son alargadas (Horton, 1932), en este tipo de cuencas es común observar que el flujo superficial de un evento de lluvia genera avenidas con picos atenuados y de larga duración, a diferencia de las cuencas circulares, cuyas avenidas se caracterizan por picos de corta duración (Biswas et al., 1999). Estudios realizados en cuencas semiáridas han demostrado que una forma alargada está asociada con una mayor capacidad de infiltración (Méndez-Gutiérrez et al., 2021; Asfaw y Workineh, 2019; Flores, 2012). Este patrón se confirma en la proporción de elongación (P_e) que los valores

oscilan entre 0.48 y 0.51 en ambas microcuencas, se confirma que se trata de una cuenca alargada según con la clasificación propuesta por Abdulkareem et al. (2018). De igual manera, la relación de circularidad (R_c) refleja esta característica con valores de 0.51 para El Maguey y 0.45 para Pánuco lo que indica una descarga lenta de los escurrimientos con condiciones permeables (Singh et al., 2014), además, Servin-Palestina et al. (2022) confirman que el acuífero Calera donde se ubican las dos microcuencas presenta una permeabilidad moderada a baja. Asimismo, con relación al coeficiente de compacidad (C_c) que indica la relación directa con el escurrimiento superficial resultante de los eventos de lluvia, incidiendo en el tiempo de concentración (Lux, 2016), para la microcuenca el maguey su valor es 1.39 y para Pánuco 1.46, indicando que ambas microcuencas son de forma oval-redonda a oval oblonga (Campos-Aranda, 1998), esto implica una menor susceptibilidad a avenidas rápidas, si los flujos laterales que alimentan el cauce principal son pequeños debido a reducidas áreas de captación (José-Ríos et al., 2018).

Relieve

El análisis altitudinal de la microcuenca El Maguey presenta cotas entre 2547 m y 2266 m, mientras que Pánuco varía entre 2658 m y 2310 m. Esto se traduce en desniveles de 281 m y 348 m, respectivamente. Estos valores, inferiores a 400 m se clasifican como desniveles bajos según Sakthivel et al. (2019). El desnivel es un factor fundamental para estimar el tiempo de concentración de escurrimientos y comprender las dinámicas de inundación como señalan Bashir y Alsalman (2024). En cuanto a la pendiente, tanto la media de la microcuenca (P_{mcue}) como la del cauce principal (P_{mc}) son mayores en Pánuco (1.69% y 3.88%, respectivamente) que en El Maguey (1.40% y 1.81%, respectivamente). Esta diferencia sugiere un flujo de agua más rápido en Pánuco, lo que se traduce en un escurrimiento más rápido y un mayor potencial de erosión, esta observación se refleja en el menor tiempo de concentración en Pánuco, lo que a su vez implica una respuesta hidrológica más rápida. La pendiente es un indicador clave de la intensidad de erosión como afirman Abdulkareem et al. (2018). Los resultados concuerdan con Chandhiha y Kansal (2017), quienes demostraron que cuencas con mayores pendientes experimentan tiempos de respuesta hidrológica más cortos y un

mayor riesgo de inundaciones localizadas. Es fundamental reconocer que la dinámica hidrológica es un fenómeno complejo influenciado por múltiples factores como señalan Caicedo et al. (2021) y Campos-Aranda (1998). En este estudio, las microcuencas presentan características heterogéneas que pueden influir en su respuesta hidrológica, el Maguey se distingue por la presencia de barreras vivas de nopal, cuyo efecto en el balance hídrico está siendo analizado. En contraste, Pánuco carece de estas barreras. Además, aunque ambas microcuencas comparten grupos de suelos similares (Leptosoles y Calcisoles), su proporción varía, en el Maguey, los Leptosoles son más extensos, mientras que en Pánuco predominan los Calcisoles (INEGI, 2021). Es importante destacar que tanto la FAO (2015) como la IUSS (2007) sugieren que estos grupos de suelos son comunes en áreas de sierras y lomeríos, tienen una capacidad limitada de retención de agua debido a su naturaleza somera y pedregosa. Esta característica favorece la escorrentía superficial y podría amplificar las diferencias en la respuesta hidrológica entre ambas microcuencas, especialmente durante eventos de lluvia intensa. Finalmente, el coeficiente de rugosidad, un parámetro que influye en el escurrimiento superficial al estimar la velocidad del flujo y el caudal (Chow, 1994), muestra valores de 0.035 para El Maguey y 0.030 para Pánuco, el menor valor en Pánuco indica una menor resistencia al flujo del agua, lo que sugiere una mayor velocidad de escurrimiento en esta microcuenca. Esta diferencia podría atribuirse a la presencia de mayores obstáculos en el cauce de El Maguey, como la vegetación o la presencia de barreras vivas.

Curva hipsométrica

En las figuras 4 y 5 se presentan las curvas hipsométricas las microcuencas de estudio, las cuales se encuentran en una etapa sedimentaria o madura, de acuerdo con la clasificación de Strahler (1952). Estudios previos, como el de Martínez-Ramírez et al. (2017), reportaron resultados similares. Sin embargo, Strahler (1952) señala que la madurez es una característica común en cuencas de tercer o cuarto orden, especialmente cuando predominan rocas relativamente homogéneas. En el caso de las microcuencas analizadas, el tipo de roca es ígnea, tanto intrusiva como extrusiva, lo cual se relaciona con su ubicación en zonas de lomeríos y sierras. En este sentido, Gajbhiye

et al. (2014) destacan que este tipo de cuencas son favorables para la gestión del agua mediante proyectos de conservación, ya que su tasa de erosión suele ser moderada. Sin embargo, Ritter et al. (2002) advierten que pueden experimentar procesos de erosión acelerada si se presentan eventos de precipitación extrema que generen altos niveles de escurrimiento.

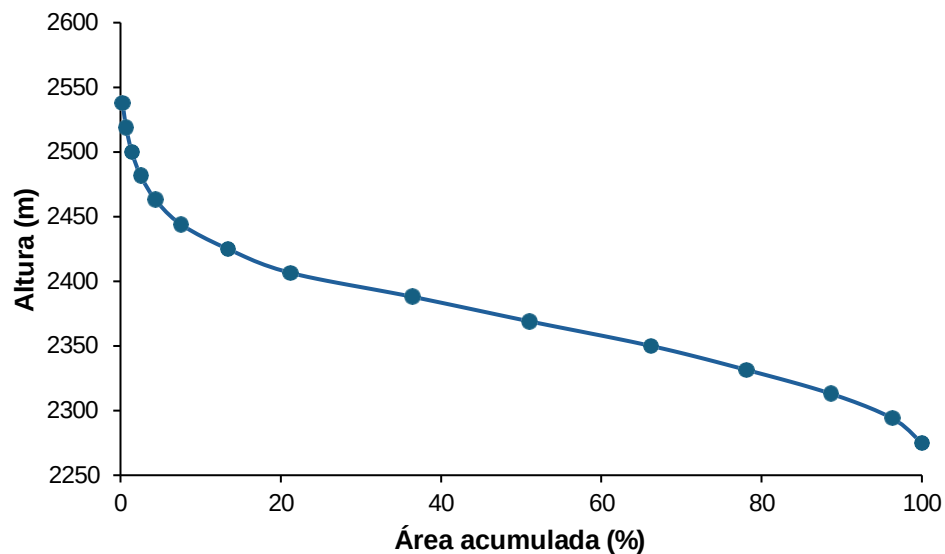


Figura 4. Curva hipsométrica de la microcuenca el Maguey

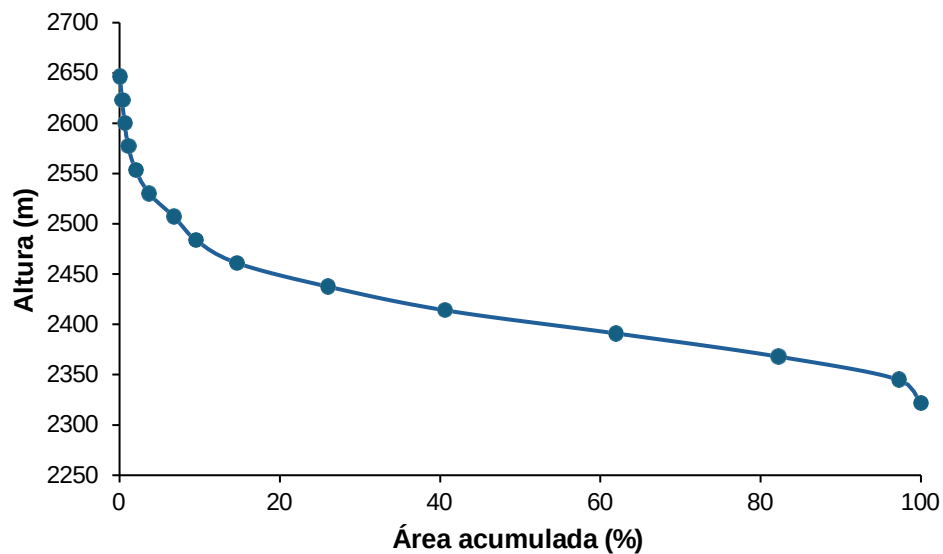


Figura 5. Curva hipsométrica de la microcuenca Pánuco

Red hidrológica

De acuerdo con la clasificación de la red de drenaje propuesta por Strahler (1964), las microcuencas analizadas corresponden al cuarto orden. En este contexto, se observa que la longitud de la corriente principal en la microcuenca de El Maguey es de 7.97 km, mientras que en Pánuco es de 7.88 km, presentando valores similares. Según Aparicio (1989), la longitud del cauce principal influye en la relación entre la precipitación y el escurrimiento, lo que sugiere que ambas microcuencas pueden compartir características hidrológicas comparables.

Por otro lado, Jha et al. (2022) y Swetha & Reddy (2019) destacan que la conformación de la red de drenaje está determinada por factores como el grupo de suelo, la cobertura vegetal, la geología, las precipitaciones y la pendiente del terreno. En este estudio, se encontró que el total de cauces en la red de drenaje es de 35 para El Maguey y 36 para Pánuco. Además, se identificaron que los cauces de primer orden predominan en ambas microcuencas (figura 6 y 7), lo que indica que la mayoría de los canales no cuentan con afluentes y solo transportan agua durante eventos de precipitación. Navarro-Lozano et al. (2012) señalan que estos cauces iniciales son los responsables del arrastre de sedimentos hacia las zonas más bajas de la cuenca.

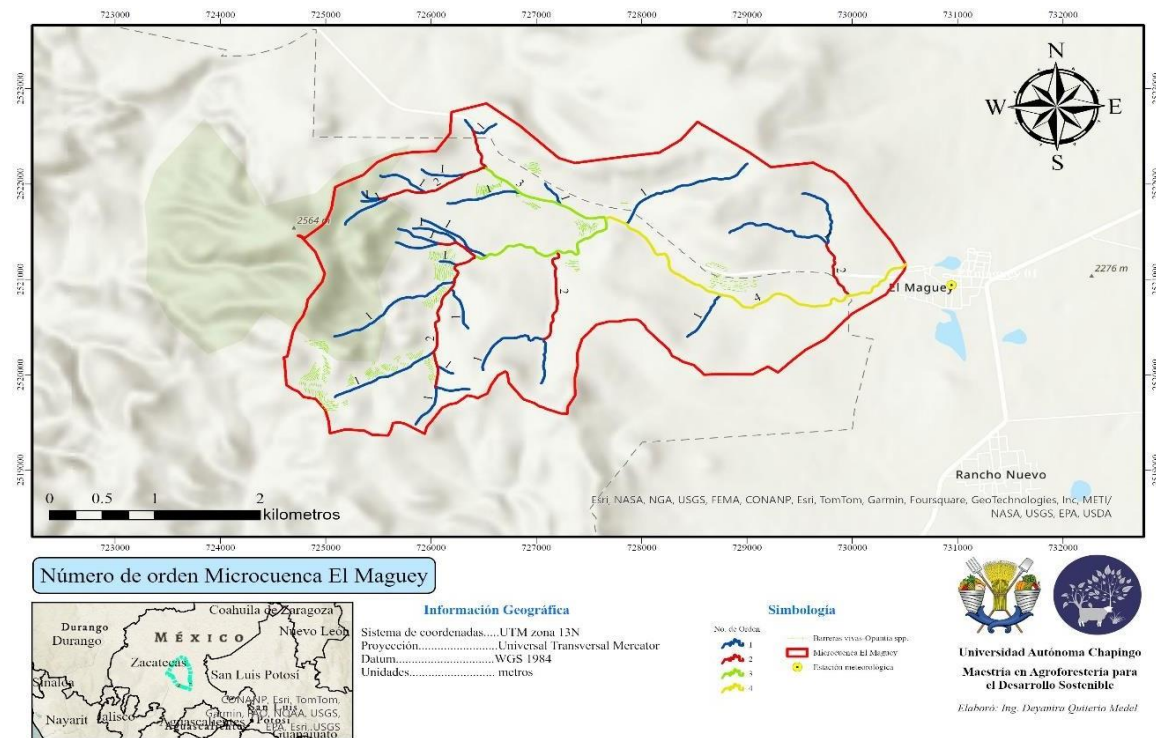


Figura 6. Número de orden de la red de drenaje del Maguey

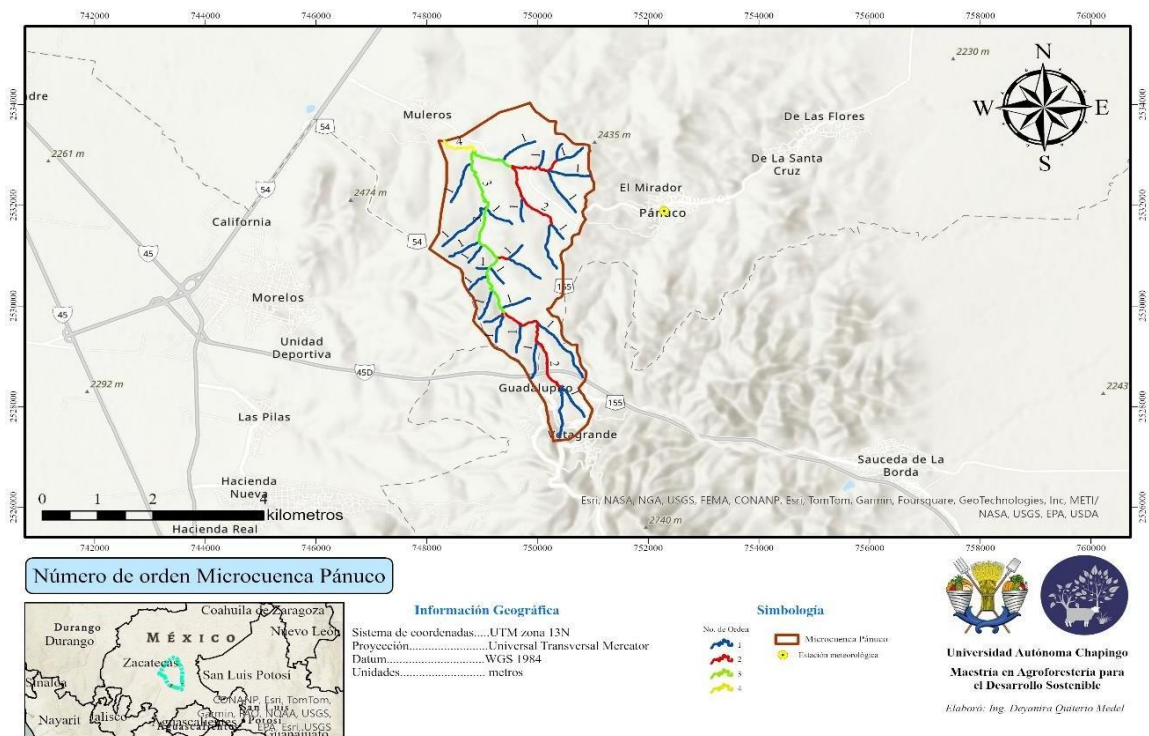


Figura 7. Número de orden de la red de drenaje Pánuco

Asimismo, la relación de bifurcación (R_f) en ambas microcuencas varió entre 3.11 y 3.36, valores similares a los reportados por Choudhari et al. (2018) para regiones montañosas con pendiente moderada, esto indica que el escurrimiento en estas microcuencas puede oscilar entre moderada y alta, con una permeabilidad del suelo también moderada. En cuanto a la densidad de drenaje (D_d), se obtuvo un valor de 0.60 km/km² para El Maguey y de 0.70 km/km² para Pánuco, mientras que la densidad hidrográfica (D_h) fue mayor en Pánuco (3.19 L/km²) en comparación con El Maguey (2.79 km/km²). Según con Sakthivel et al. (2019), áreas con una mayor densidad de drenaje suelen estar asociadas con una mayor susceptibilidad a la erosión y un predominio del flujo superficial, lo que sugiere que la microcuenca de Pánuco podría presentar una mayor tasa de erosión en comparación con El Maguey.

Cuadro 2. Orden de las corrientes en la microcuenca el Maguey

No. De Orden	No. De corrientes	Longitud total (km)
1	26	14.36
2	6	5.20
3	2	2.94
4	1	3.59
Total	35	26.10

Cuadro 3. Orden de las corrientes en la microcuenca Pánuco

No. De Orden	No. De corrientes	Longitud total (km)
1	28	18.33
2	5	5.12
3	2	4.70
4	1	0.68
Total	36	28.88

Otros estudios en zonas áridas y semiáridas han demostrado patrones similares. Por ejemplo, Mahala (2020) destaca que las cuencas con formas alargadas y pendientes pronunciadas, como Pánuco, tienen un comportamiento más agresivo en términos de escurrimiento y transporte de sedimentos. Asimismo, investigaciones realizadas por Méndez-Gutiérrez et al. (2021) en regiones con suelos calcisoles y leptosoles confirmaron que estas áreas presentan una menor infiltración, lo que subraya la importancia de

estrategias de manejo de recursos hídricos para mitigar el impacto de la erosión y optimizar la captación de agua.

Cuadro 4. Resultado de los parámetros morfométricos de las microcuencas

Parámetro	El Maguey	Pánuco
Área (A) km ²	12.73	11.26
Perímetro (P) km	17.73	17.58
Longitud del cauce principal (L _c) km	7.97	7.88
Longitud total de las corrientes (km)	26.10	28.85
Índice de forma (I _f)	0.20	0.18
Coeficiente de compacidad (C _c)	1.39	1.46
Relación de circularidad (R _c)	0.51	0.45
Proporción de elongación (P _e)	0.51	0.48
Pendiente media de la cuenca (P _{mcue}) %	1.40	1.69
Pendiente media del cauce principal (P _{mc}) %	1.81	3.88
Orden de corrientes (u)	4	4
Número de cauces (Nu)	35	36
Densidad hidrográfica (D _h) L/km ²	2.74	3.19
Densidad de drenaje (D _d) km/km ²	0.62	0.70
Relación de bifurcación (R _b)	3.11	3.36
Tiempo de concentración (t _c) min	24.24	16.44
Coeficiente de rugosidad	0.035	0.030

3.5.2 Clasificación supervisada

Los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada empleando Maquinas de Soporte de Vectores para la microcuenca el maguey presenta valores que indican una excelente concordancia estadística entre las clasificaciones y la verdad del terreno. Las clases de pastizal, matorral y vegetación de galería obtuvieron una precisión de usuario y una precisión del productor del 100%, sin embargo, para la clase de bosque la precisión es de 92% refleja algunos errores de inclusión, debido a la confusión con matorral, este tipo de confusión es común debido en áreas donde las características espectrales de las coberturas pueden sobreponerse (Pal & Mather, 2005). El valor de Kappa es de 0.98 que nos indica casi perfecta la concordancia estadística según la escala propuesta por Landis y Koch (1977), esto confirma que el modelo SVM logró diferenciar con alta precisión las clases de cobertura del suelo, dando resultados similares reportados por Mountrakis et al. (2011), quienes encontraron que SVM supera a otros algoritmos de clasificación, especialmente en áreas con una mezcla compleja de coberturas. Por otro lado, la precisión global es del 99% que le da robustez del modelo en la asignación de clases.

Cuadro 8. Matriz de confusión y medidas globales en porcentaje por coberturas para la microcuenca el Maguey.

Clases		Terreno					Total	Precisión Usuario
		Cuerpo de agua	Bosque	Pastizal	Matorral	Vegetación de galería		
Clasificación	Cuerpo de agua	6	0	0	0	0	9	1
	Bosque	0	11	0	1	0	12	0.92
	Pastizal	0	0	381	0	0	381	1.00
	Matorral	0	0	0	60	0	90	1.00
	Vegetación de galería	0	0	0	0	11	11	1.00
	Total	9	11	381	91	11	506	
Precisión productor		1.00	1.00	1.00	0.99	1.00		
Precisión global		0.99	99%					
Pe		0.60	60%					
Kappa		0.98	98%					

Por otro lado, la precisión para la clasificación supervisada para la microcuenca Pánuco para las clases de cuerpo de agua y zona agrícola alcanzaron una precisión del productor del 100%, sin embargo, la precisión del usuario para el cuerpo de agua fue del 90%, indicando un error debido a la confusión de suelos desnudos. Este hallazgo es consistente con estudios que destacan que cuerpos de agua pequeños o con bordes irregulares pueden confundirse espectralmente con áreas de suelo desnudo en imágenes satelitales (Lillesand et al., 2015; Foody, 2002). Para zona urbana la precisión del usuario y del productor fueron de 92% y 100% respectivamente, aunque el modelo clasifica correctamente, algunos píxeles de suelos desnudos se clasificaron como urbanos, probablemente debido a texturas espectrales similares, como lo han señalado Zhao et al. (2019).

El índice kappa de 0.96 indica una concordancia estadística casi perfecta entre la clasificación realizada y la verdad de campo. Este valor respalda la eficacia del algoritmo SVM en la clasificación de coberturas del suelo, así como los valores de precisión global, lo que concuerda con estudios recientes que destacan la capacidad de SVM para manejar datos espectrales complejos y minimizar los errores de clasificación (Camps-Valls et al., 2021; Mountrakis et al., 2011).

Cuadro 9. Matriz de confusión y medidas globales en porcentaje por coberturas para la microcuenca Pánuco.

Clases		Terreno						Total	Precisión Usuario
		Cuerpo de agua	Zona urbana	Suelo desnudo	Pastizal	Matorral	Zona agrícola		
Clasificación	Cuerpo de agua	9	0	1	0	0	0	10	0.90
	Zona urbana	0	22	2	0	0	0	24	0.92
	Suelo desnudo	0	0	10	0	0	0	10	1.00
	Pastizal	0	0	4	230	5	0	239	0.96
	Matorral	0	0	0	0	226	0	226	1.00
	Zona agrícola	0	0	0	0	0	10	10	1.00
	Total	9	22	17	230	231	10	519	
Precisión productor		1.00	1.00	0.59	1.00	0.98	1.00		
Precisión global		0.98	98%						
Pe		0.40	40%						
Kappa		0.96	96%						

3.6 CONCLUSIONES

El análisis morfométrico de las microcuencas El Maguey y Pánuco permitió identificar diferencias clave en su dinámica hidrológica, relacionadas con la generación de escurrimiento, la infiltración y la evapotranspiración. La forma alargada de ambas cuencas, en conjunto con su baja relación de circularidad y coeficiente de compacidad, sugiere una menor susceptibilidad a crecidas rápidas, favoreciendo una descarga más controlada del escurrimiento superficial. Sin embargo, la pendiente media de la cuenca y del cauce principal es mayor en Pánuco, lo que indica un flujo de agua más rápido y una mayor propensión a la erosión, mientras que en El Maguey el flujo es más atenuado, favoreciendo la infiltración en ciertas áreas.

La densidad de drenaje y la densidad hidrográfica, mayores en Pánuco, indican que el flujo superficial sobre la infiltración, es decir, existe una menor recarga del acuífero y una mayor vulnerabilidad a la erosión hídrica. En contraste, la presencia de barreras vivas de nopal en El Maguey podría estar influyendo en la retención de humedad y en la reducción del escurrimiento, promoviendo una mayor evapotranspiración y potencialmente una mayor infiltración local.

En términos generales, la relación entre la precipitación, el escurrimiento y la infiltración en estas microcuencas está condicionada por factores como la pendiente, la estructura

de la red de drenaje, la cobertura vegetal y el tipo de suelo. La predominancia de suelos leptosoles y calcisoles, caracterizados por su baja capacidad de retención de agua, aunque exista infiltración, esta es limitada, favoreciendo una respuesta hidrológica rápida en eventos de lluvia intensa. La importancia de estrategias de conservación del suelo y agua, en combinación con tecnologías agroforestales en cuencas que favorezcan la infiltración y reduzcan la erosión, contribuyen a una gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

Además, la integración de herramientas geoespaciales y técnicas avanzadas como el algoritmo SVM permitió una caracterización precisa de las microcuencas, alcanzando altos niveles de exactitud en la clasificación de la cobertura vegetal.

3.7 Literatura citada

- Adankon, M., Cheriet, M., 2015. Support Vector Machine. En S. Z. Li and A. K. Jain, Encyclopedia of Biometrics, London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7488-4_2.
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J. P., Blaschke, T., Pradhan, B., & Tien Bui, D. (2020). Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using novel gis-based ensemble model. *Remote Sensing*, 12(5), 874.
- Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.003>
- Banerjee, A., Singh, P., & Pratap, K. (2017). Morphometric evaluation of Swarnrekha watershed, Madhya Pradesh, India: An integrated GISbased approach. *Journal Applied Water Science*, 7, 1807. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0354-3>
- Bashir, B., & Alsalman, A. (2024). Flooding Hazard Vulnerability Assessment Using Remote Sensing Data and Geospatial Techniques: A Case Study from Mekkah Province, Saudi Arabia. *Water*, 16(19), 2714. <https://doi.org/10.3390/w16192714>
- Becerra Moreno, A. (2005). Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México

- Bogale, A. (2021). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 11(7), 122.
- Caicedo Toro, Micheal David, Cabrera Estupiñán, Eric, Zambrano Navarrete, Xiomara Alejandra, Rodríguez Bravo, Miller Ernesto, & Intriago Zambrano, Pedro Elías. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8(spe2), 00022. Epub 21 de abril de 2021. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2605>
- Campos-Taberner, M., García-Haro, F.J., Martínez, B., Gilabert, M.A. 2020. Deep learning for agricultural land use classification from Sentinel-2. *Revista de Teledetección* 56, 35-48. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13337>
- Chagas, A.M.S., De Montenegro, A.A., De Andrade Farias, C.W.L., Lins, F.A.C., Silva, J.R.I., 2022. Use of geotechnologies for morphometric analysis of experimental basin in the semiarid region to support hydrological simulation. *Rev. Eng. na Agric.-REVENG* 30, pp. 19-35. <https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.12629>
- Chandniha, S. K., & Kansal, M. L. (2017). Prioritization of sub-watersheds based on morphometric analysis using geospatial technique in Piperiya watershed, India. *Applied Water Science*, 7, 329-338. DOI 10.1007/s13201-014-0248-9
- Choudhari, Gaurav K. Nigam, Sudhir Kumar Singh & SapanaThakur (2018): Morphometric based prioritization of watershed for groundwater potentialof Mula river basin, Maharashtra, India, *Geology, Ecology, and Landscapes*, DOI:10.1080/24749508.2018.1452482To
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, España: Ariel SA Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [SEPSA](2019) *Informe Comercio Exterior del Sector Agropecuario 2017-2018*.
- Congedo, L., 2018. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, Scp, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1219.3524>
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23.
- Del Aguila, S., & Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 538-562.
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdu, A., Pereira-Sandoval, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., ... & Moreno, J. (2016). Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y

- calidad de aguas continentales. In Conference: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota Y Sistemas de Información Geográfica (SELPER).
- European Space Agency (ESA), 2020. Sentinel Online, Level C-1. Disponible en: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/SupportVectorMachine.html>
- Faye, C. (2018). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques: cas du bassin versant de la Gambie.(bassin continental Guineo-Sénégalais).
- García, E. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppe; UNAM, Ed.; Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México, 2004; ISBN 970-32-1010-4.
- Gravelius, H. (1914): Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985): Morphometry of Drainage Basins. Amsterdam, Elsevier
- Gutiérrez, R. D. G., López, J. L. O., Villa, Ó. R. M., & García, Ó. A. B. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (24), 9.
- Hernández, G. T., & Manzo, L. A. V. (2022). Caracterización morfométrica de la cuenca del río Huitzilac, Puebla, México. *Boletín Geográfico*, 44(1), 41-58.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions*, 13(1), 350-361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- Hurtado, P. B., Cohen, I. S., Arriaga, G. E., Valle, M. A. V., & Ibarra, M. A. I. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *Agrofaz*, 13(2).
- Jothimani, M., Dawit, Z., & Mulualem, W. (2021). Flood susceptibility modeling of Megech river catchment, lake tana basin, north western Ethiopia, using morphometric analysis. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 353-364.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. Guatemala, Guatemala: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two diferent morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10 (33), 1-16.

- Mani, A., Kumari, M., & Badola, R. (2022). Morphometric analysis of Suswa River Basin using geospatial techniques. *Engineering Proceedings*, 27(1), 65.
- Martínez-Ramírez, Á., Steinich, B., & Tuxpan, J. (2017). Morphometric and hypsometric analysis in the Tierra Nueva Basin, San Luis Potosí, México. *Environmental Earth Sciences*, 76, 444. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6766-7>
- Marzo-Manuel, Y., & Gomez-Luna, L. M. (2024). Evaluación del potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso, Cuba. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 15(6), 255–310. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-06-06>
- Medeiros, F., Lima, J., Silva, R., Pereira, S., Freitas, A., Lima, A., Lima, L., Silva, J. L., & Monte, A. (2019). Analysis of morphometric variables of river Espinharas hydrographic sub-basin using geographic information system. *Journal of Experimental Agriculture International*, 31(6), 1-8. DOI <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v31i6300>
- Méndez-Gutiérrez, América Guadalupe, Corral-Rivas, Sacramento, Nájera-Luna, Juan Abel, Cruz-Cobos, Francisco, & Pompa-García, Marín. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 39, e641. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>
- Miller, V. C. (1957): A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR 389-042, Technical Report, 3, Columbia University.
- Murillo C. R. A. (2021). Implementación del método máquinas de soporte vectorial en bases de datos espaciales para análisis de clasificación supervisada en imágenes de sensores remotos. *Revista cartográfica*, (102), 27-42. Epub 14 de marzo de 2022. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.830>
- Ortiz-Vera, O. (2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 25-44
- Oruonye, E., Ezekiel, B., Atiku, H., Baba, E., & Musa, N. (2016). Drainage basin morphometric parameters of River Lamurde: implication for hydrologic and geomorphic processes. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 5(2), 1-11.
- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 7, 217-232.
- Richards, J. A., & Richards, J. A. (2022). Remote sensing digital image analysis (Vol. 5, pp. 256-258). Berlin/Heidelberg, Germany: springer.

- Sakthivel, R., Jawahar Raj, N., Sivasankar, V., Akhila, P., & Omine, K. (2019). Geo-spatial technique-based approach on drainage morphometric analysis at Kalrayan Hills, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 9, 1-18.
- Sánchez Vélez, A.S, García Núñez, R.M., & Palma Trujano, A. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. SEMARNAT, CONAGUA
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 597–646
- Servin-Palestina, M., Martinez-Ruiz, A., & Echavarria-Chairez, F. (2022). Optimization of water for agriculture from the Calera Zacatecas Aquifer. *Journal of Natural & Agricultural Sciences/Revista de Ciencias Naturales & Agropecuarias*, 9(24)
- Silva, J.R.I., De Souza, E.S., Souza, R., Dos Santos, E.S., Antonino, A.C.D., (2019). Efeito de diferentes usos do solo na erosão hídrica em região semiárida. *Rev. Eng. na Agric.* 27 (3), 272-283. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i3.867>
- Silva, J.R.I., Montenegro, A.A.A., Farias, C.W.L.A., Jardim, A.M.R.F., Da Silva, T.G.F., Montenegro, S.M.G.L., (2022). Morphometric characterization and land use of the Pajeú river basin in the Brazilian semi-arid region. *J. S. Am. Earth Sci.* 118, 103939. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103939>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of basins and channel networks. En Chow, V.T. (ed.) *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw Hill Book Company, 4-36.
- Témez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. https://www2.mitma.es/recursos_mfom/0610400.pdf
- Torres, R. G., Bezada, M., & Santalla, I. R. (2023). Cartografía de cobertura del suelo mediante datos de teledetección en la planicie de desborde del río Apure (Venezuela). *Cuadernos de investigación geográfica: Geographical Research Letters*, 49(1), 113-137.
- Zanandrea, J. F., Gaspari, F. J., Perdomo, S., & Laurencena, P. (2024). Morfometría de la cuenca del río Areco, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS*, (11), e009. <https://doi.org/10.24215/18522181e009>
- Jha, A., Gupta, N. C., & Dey, B. (2022). Morphometric Analysis of Gandak River Drainage Basin Using Geographic Information System (GIS) And SRTM-DEM. *Geology*, 4(18), 31.

4 ANÁLISIS DE LLUVIA- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN DOS MICROCUENCAS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

4.1 Resumen

El manejo de recursos hídricos en regiones sin aforo es un desafío crítico, justificando la necesidad de herramientas de modelación hidrológica como HEC-HMS. El objetivo de esta investigación fue estimar la infiltración mediante el modelo hidrológico HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) en dos microcuencas con presencia y ausencia de barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) para su análisis en dos eventos de lluvias octubre y noviembre del 2023, se estimó el escurrimiento superficial mediante el método número de curva del extinto Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (SCS-CN). La lámina infiltrada se obtuvo por la diferencia entre la precipitación, escurrimiento superficial, retención por follaje y la evapotranspiración. Asimismo, se determinaron las propiedades hidráulicas del suelo. El Maguey a pesar de la presencia de barreras vivas, mostró escurrimiento superficial en los eventos del 11 de octubre y 22 de noviembre, teniendo un valor de infiltración de 160, 028.83 m³ y 266,311.60 m³, respecto a Pánuco con láminas de 15.20 a 23.60 mm con infiltración de 7,882.00 m³ y 215,527.66 m³. El modelo HEC-HMS es una herramienta muy útil para la modelación hidrológica, pero su efectividad puede cambiar dependiendo de las condiciones específicas de cada lugar. Además, es fundamental validar nuestros modelos con datos reales obtenidos en campo. Esto nos ayuda a desarrollar estrategias más efectivas para el manejo y la conservación del agua.

Palabras claves: HEC-HMS, infiltración, número de curva (CN), hidrograma unitario, simulación.

Tesis de maestría en ciencias, Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Deyanira Quiterio Medel

Director: Dr. David Cristóbal Acevedo

RAINFALL-RUNOFF ANALYSIS IN TWO MICRO-BASINS IN A SEMI-ARID ZONE

4.2 Abstract

Water resource management in ungauged regions is a critical challenge, justifying the need for hydrological modeling tools like HEC-HMS. The objective of this research was to estimate infiltration and potential recharge using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) hydrological model in two micro-basins, one with and one without live cactus barriers (*Opuntia* spp.), for analysis during two rainfall events in October and November 2023. Surface runoff was estimated using the curve number method from the former U.S. Soil Conservation Service (SCS CN). The infiltrated was obtained by subtracting precipitation, surface runoff, foliage interception, and evapotranspiration. Likewise, the soil's hydraulic properties were determined. Despite having live barriers, El Maguey showed greater surface runoff with rainfall events of 16.60 mm and 23.60 mm, registering 0.148 mm for October and 1.354 mm for November, with infiltration values of 160,028.83 m³ and 266,311.60 m³, respectively. In Pánuco, runoff depths were 0.103 mm in both events, due to the same precipitation depth of 15.20 a 23.60 mm, with infiltration of 7,882.00 m³ and 215,527.66 m³. The HEC-HMS model is a very useful tool for hydrological modeling, but its effectiveness can change depending on the specific conditions of each location. Furthermore, it is fundamental to validate our models with real data obtained in the field. This helps us to develop more effective strategies for water management and conservation.

Keywords: HEC-HMS, infiltration, curve number (CN), unit hydrograph, simulation.

Master's Degree Thesis in Agroforestry, Graduate Program in Agroforestry for sustainable development,
Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Deyanira Quiterio Medel

Advisor: Dr. David Cristóbal Acevedo

4.3 INTRODUCCIÓN

El manejo eficiente de los recursos hídricos es un desafío en regiones donde no existen sistemas de aforo. La modelación hidrológica surge como una herramienta indispensable para simular los procesos hidrológicos y estimar el escurrimiento superficial en estas áreas (Sahu et al., 2023), esto implica que los hidrólogos tengan que aplicar metodologías para estimar el comportamiento del escurrimiento superficial y realizar análisis en cuencas hidrográficas (Ajmal et al., 2016).

Una de las metodologías más empleadas para estimar la escorrentía es la del número de curva (CN), propuesto por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS-USDA, 2004; Angulo & Saavedra, 2021). El método del CN relaciona parámetros como el uso del suelo, la condición hidrológica del suelo, grupo hidrológico del suelo y la condición de humedad antecedente, facilitando la cuantificación de las entradas y salidas del ciclo hidrológico (Singh et al., 2023).

HEC-HMS se destaca como una herramienta empleada para la simular el proceso lluvia-escurrimiento (Alarcón et al., 2020) permitiendo estimar el CN y calcular la escorrentía, infiltración y recarga de acuíferos, además, la capacidad para representar el comportamiento físico observado en campo lo convierte en una herramienta valiosa para la investigación y gestión de recursos hídricos (Friswell & Mottershead, 1995).

Asimismo, diversos modelos hidrológicos emplean balances de agua para analizar cuencas hidrográficas a gran escala, considerando variables como precipitación, evapotranspiración, infiltración y escurrimiento. Estas metodologías proporcionan un análisis integral del ciclo hidrológico y han sido ampliamente respaldadas en investigaciones recientes como Montiel Gonzaga et al. (2019); Kalédjé et al. (2020); Zhang et al. (2021); Girón- Méndez et al. (2023); Salem et al. (2023); Ramírez-Sánchez et al. (2024). El presente estudio tiene como objetivo estimar la infiltración y recarga potencial mediante el modelo hidrológico HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) en dos microcuencas con presencia y ausencia de barreras vivas con nopal (*Opuntia spp.*) para su análisis.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1 Área de estudio

El acuífero Calera, ubicado en la porción oriental del estado de Zacatecas, México (Figura 8) entre las coordenadas 22°41' y 23° 24' de latitud, y entre 102°33' y 103° 01' de longitud, abarca una superficie de aproximadamente 2,226 km² (Hernández et al., 2012). Es una cuenca cerrada donde los cuerpos de agua son arroyos no perennes, lo que significa que no hay grandes ríos ni reservorios importantes en la zona de estudio (Núñez et al., 2004).

La altitud del acuífero Calera varía entre los 600 y 2000 msnm. Su formación incluye unidades de origen volcánico de la Sierra Madre Occidental, así como materiales aluviales y lacustres como arcilla, limo, arena y grava cementados con arcilla calcárea. La litología de la región comprende rocas ígneas, calizas, dolomitas y rocas metamórficas fracturadas debido a movimientos tectónicos (Dávila et al., 2012). El tipo de suelo predominante es el catañozen lúdico, resultado del transporte de material aluvial que caracteriza la región (INEGI, 2014).

Según la clasificación de Köppen, adaptada por Enriqueta García, la mayor parte del acuífero tiene un clima semiseco templado BS1kw. Con una precipitación anual promedio de 425 mm y una evaporación de alrededor de 2,263 mm al año (CONAGUA, 2018).

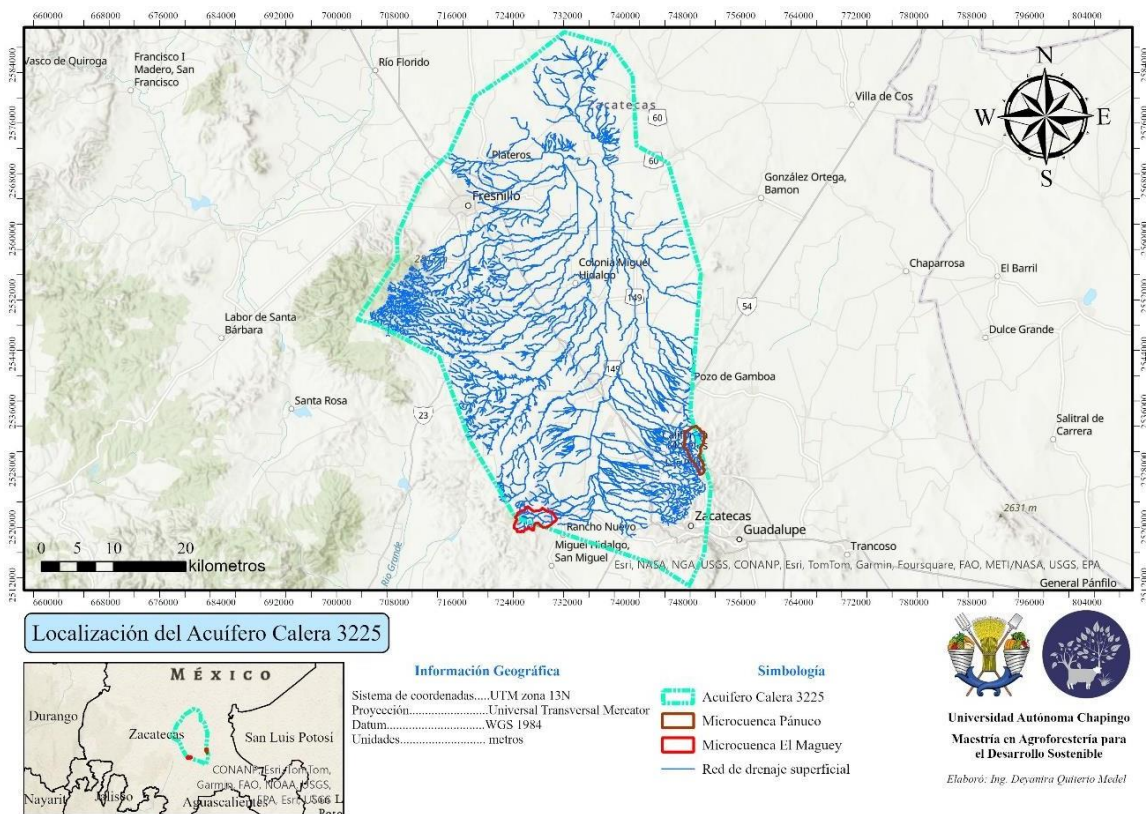


Figura 8. Localización del sitio de estudio.

4.4.2 Microcuencas de estudio

Utilizando el software ArcGIS pro como herramienta de SIG se procesó un modelo de elevación digital (DEM) de resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m obtenido de sitio oficial <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>. El DEM se proyectó al sistema de referencia espacial UTM en zona 13 N y se recortó con la capa vectorial del sitio de estudio. Posteriormente, se realizó el proceso de manera automatizado de la delimitación de las microcuencas mediante un *Model Builder*, asimismo, se definieron las corrientes de la red de drenaje superficial y el orden del número de corrientes (Figura 9).



50

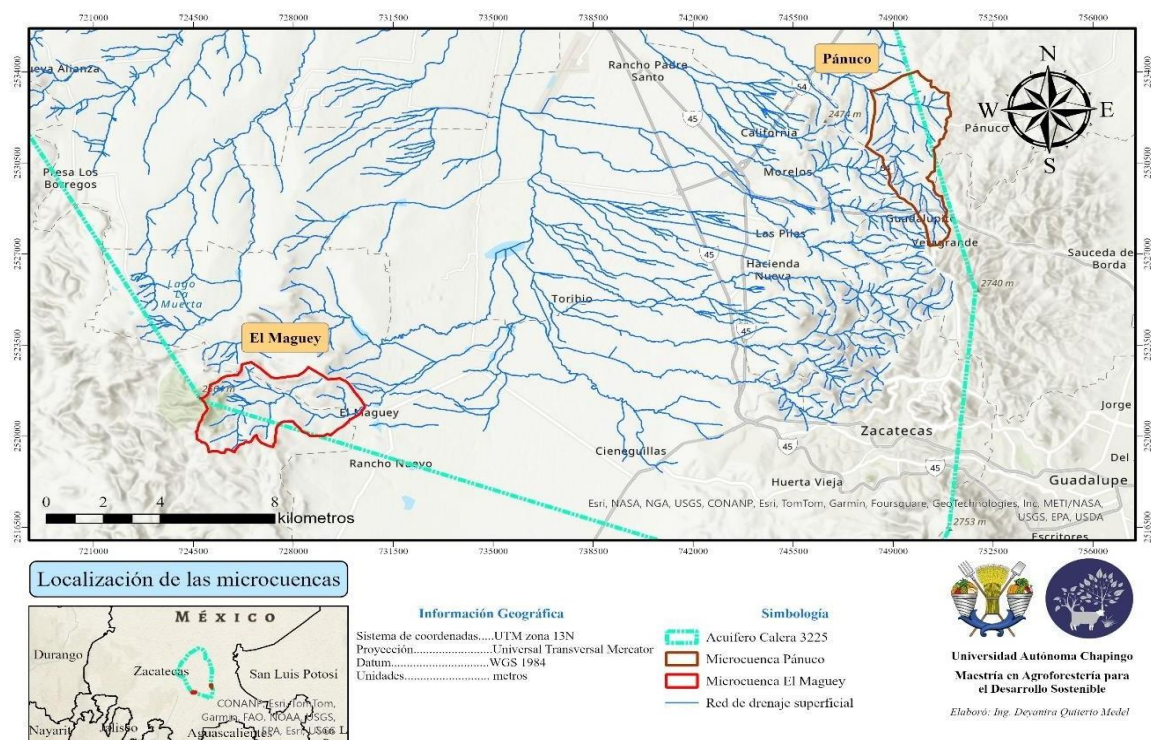


Figura 10. Localización de las microcuenas.

Cuadro 5. Características de las microcuenas.

microcuenca	Área (ha)	Perímetro (m)	Pendiente promedio (%)	Grupo de suelo	Textura	Longitud de la corriente principal (m)	Pendiente promedio del cauce principal (%)
El Maguey	1,273.45	17,732.26	1.40	Leptosol Lúvico Calcisol Éutrico	Franco arenosa Franco arcillo arenosa Arcillosa	7,970	1.81
Pánuco	1,126.05	17,580	1.69	Calcisol Húmico Leptosol Éutrico	Franco arcillosa Franco arcillosa arenosa Franco arenosa	7,880	3.81

4.4.3 Uso de suelo

Se llevó a cabo una clasificación supervisada utilizando el método de Máquinas de Soporte Vectorial un algoritmo de aprendizaje automático reconocido por su alta precisión el análisis mostró índices de kappa entre 0.96 y 0.98, lo que refleja un nivel significativo de exactitud, este método se aplicó para realizar el análisis de forma local. Dentro del acuífero Calera se identificó dos microcuencas El Maguey y Pánuco, el cuadro 1 muestra que el pastizal ocupa la mayor parte del área total con 991. 57 ha, representando el 77.89% de la superficie, principalmente para actividades de pastoreo la especie de pasto que se encontró fue zacate de llano (*Microchloa kunthii* Desv) (Figura 11), seguido por matorral con una superficie de 200 ha que equivale el 15.71% respecto a la superficie total suelen ser áreas con vegetación densa y bajas, las especies identificadas fueron sotol brillante (*Dasyllirion leiophyllum* Engelm. Ex Trel.), mezquite (*Prosopis juliflora*), nopal (*Opuntia* spp.), maguey (*Agave* spp.), hojasén (*Flourensia cernua*), *Yucca filifera*, huizache (*Acacia* spp.) y chile burro (*Stevia serrata* Cav.) debido que algunas especies son del paladar del ganado, el bosque de encino ocupa la superficie de 32 ha (2.51%) que se encuentra en las partes más altas de la cuenca como la especie encino colorado (*Quercus crassifolia*), los cuerpos de agua representan el 0.71% de la superficie respecto al total que equivale a 9 ha estas son de categoría intermitente, las barreras vivas con nopal (*Opuntia* spp.) con 8.43 ha (0.66%) que son la tecnología agroforestal (figura 9) y por último, la vegetación de galería con una superficie de 32 ha (2.51%) donde se encuentran las especies de *Salix* spp. y *Taxodium* spp.

Cuadro 2. Superficie total de uso de suelo en la microcuenca El Maguey.

Uso de suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cuerpo de agua	9.00	0.71
Bosque	32.00	2.51
Barreras vivas <i>Opuntia</i> spp.	8.43	0.66
Pastizal	991.57	77.89
Matorral	200.00	15.71
Vegetación de galería	32.00	2.51
Total	1,273.00	100.00

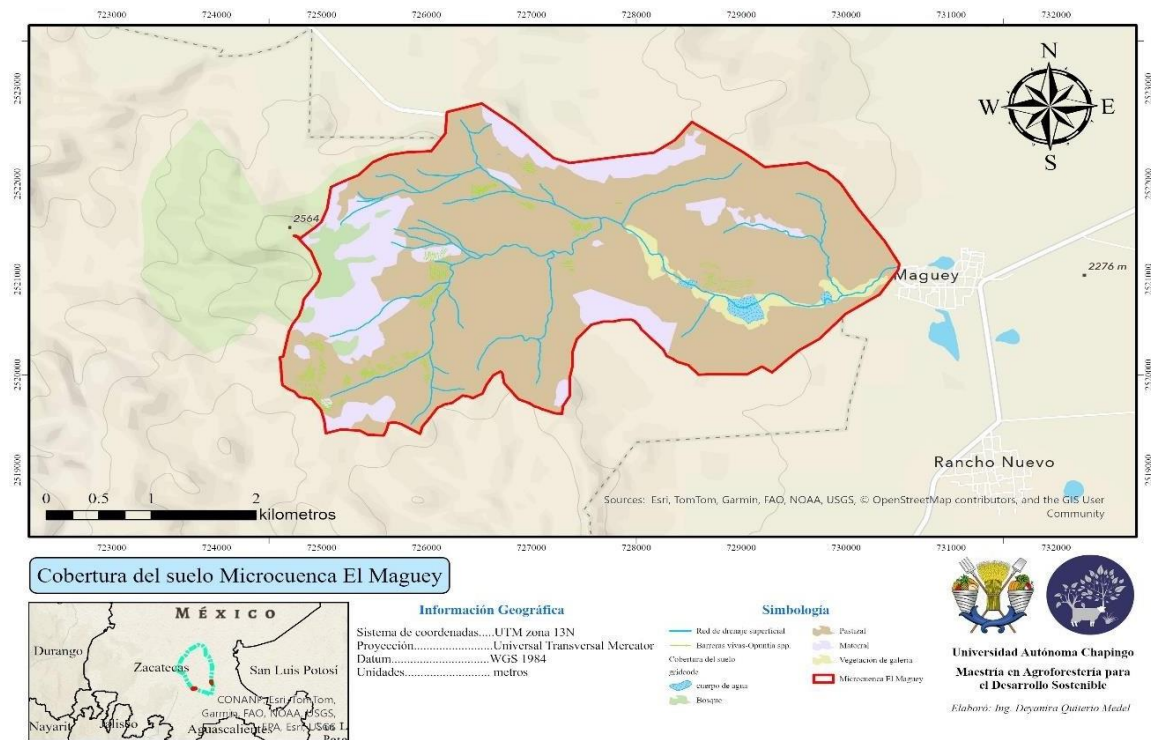


Figura 11. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca el Maguey.



Figura 12. Pastoreo de ganado bovino dentro de la microcuenca.

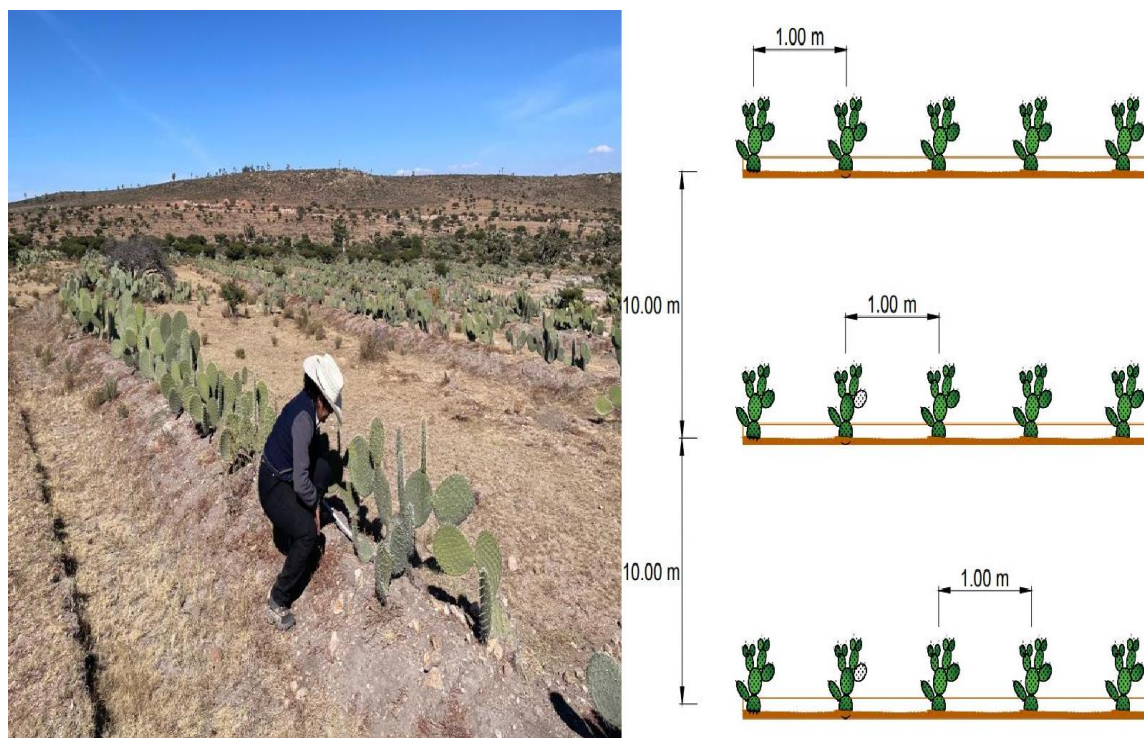


Figura 13. Diseño de las barreras vivas de nopal (*Opuntia* spp.)

En la microcuenca Pánuco (Cuadro 3) cuenta con una superficie total de 1,126.03 ha, donde el pastizal comprende de 788.40 ha respecto al total que equivale el 70.02% área destinada para pastoreo con especies *Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis*, Lag , *Aristida* spp, zacate lobo (*Lycurus phleoides*), cola de zorra (*Cortaderia selloana*)., el matorral ocupa el 26.11% siendo el segundo donde la especie uña de gato (*Mimosa aculeaticarpa*) la más predominante (figura 10), *Yucca filifera*, engorda cabra (*Dalea bicolor*), Mezquite (*Prosopis juliflora*), jaral (), tatalencho (*Gymnosperma glutinosum*), maguey (*Agave* spp.), huizache (*Acacia* spp.), gobernadora (*Larrea tridentata*), nopal (*Opuntia* spp.) y los otros usos con superficies menor con un total conjunto de 3.87%, cabe mencionar que el suelo desnudo se debe a las minas, la zona agrícola es destina a la producción de cebada y, por último, la zona urbana es una localidad zona rural con muy poca infraestructura, que se encuentra aguas arriba de la cuenca.



Figura 14. Microcuenca Pánuco

Cuadro 3. Superficie total de uso de suelo en la microcuenca El Maguey

Uso de suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
Suelo desnudo	7.00	0.62
Agrícola	11.00	0.98
Matorral	294.00	26.11
Pastizal	788.40	70.02
cuerpo de agua	1.60	0.14
Zona urbana	24.00	2.13
Total	1,126.00	100.00

4.4.4 Caracterización del suelo

Se realizó la caracterización del suelo en las dos microcuencas, mediante un muestreo simple al azar (MSA) a una profundidad de 0 a 30 cm tomando 11 muestras en las dos microcuencas, se determinó la clase textural con el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), la densidad aparente (ρ_a) con el método de la probeta y las constantes de humedad capacidad de campo (θ_{cc}) y punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) con el método de olla y membrana de presión y el contenido de materia orgánica con el método de Walkley y Black. Con base a los resultados anteriores la conductividad hidráulica se obtuvo según valores sugeridos por Saxton y Rawls (2006). (Cuadro 5).

Cuadro 6. Características hidráulicas del suelo de las microcuencas

Microcuenca	Clase textural	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Conductividad hidráulica (mm h ⁻¹)	θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)
El Maguey	Franco arenosa	2.70	1.25	30.73	0.1639	0.2745
	Franco arcillo arenosa	2.21	1.09	7.62	0.1770	0.2637
	Franco arcillo arenosa	2.52	1.16	7.87	0.2153	0.2944
	Arcillosa	2.09	1.11	1.27	0.3033	0.2428
	Franco arenosa	1.35	1.39	22.61	0.1223	0.2237
	Arcillosa	1.78	1.11	1.78	0.2120	0.3327
	Franco arenosa	1.04	1.52	20.83	0.1560	0.2453
	Franco arenosa	1.66	1.56	37.34	0.1143	0.2115
	Franco arcillosa	3.44	1.39	9.40	0.2421	0.4062
	Franco arcillosa arenosa	3.90	1.48	4.06	0.2603	0.3943
Pánuco	Franco arenosa	5.87	1.23	35.81	0.2137	0.2931

4.4.5 Precipitación

Para recolectar información sobre la precipitación, se instalaron en el mes de enero del año 2023 estaciones meteorológicas automatizadas marca Davis 6152 Vantage Pro2® (Figura 14) en ambas microcuencas, programadas para registrar la evolución temporal de la precipitación en intervalos de 15 minutos.



Figura 15. Estaciones meteorológicas Davis 6152 Vantage Pro2®

Las estaciones registraron datos por todo un año 2023, sin embargo, para el análisis de este estudio se consideró los eventos de lluvia de las fechas de 26 de julio, 19 y 28 de agosto, 10 y 11 de octubre, 12 y 22 de noviembre y el 3 de diciembre, se seleccionaron estas fechas porque son las que coinciden en ambas microcuencas como se muestra en las figuras 16 y 17.

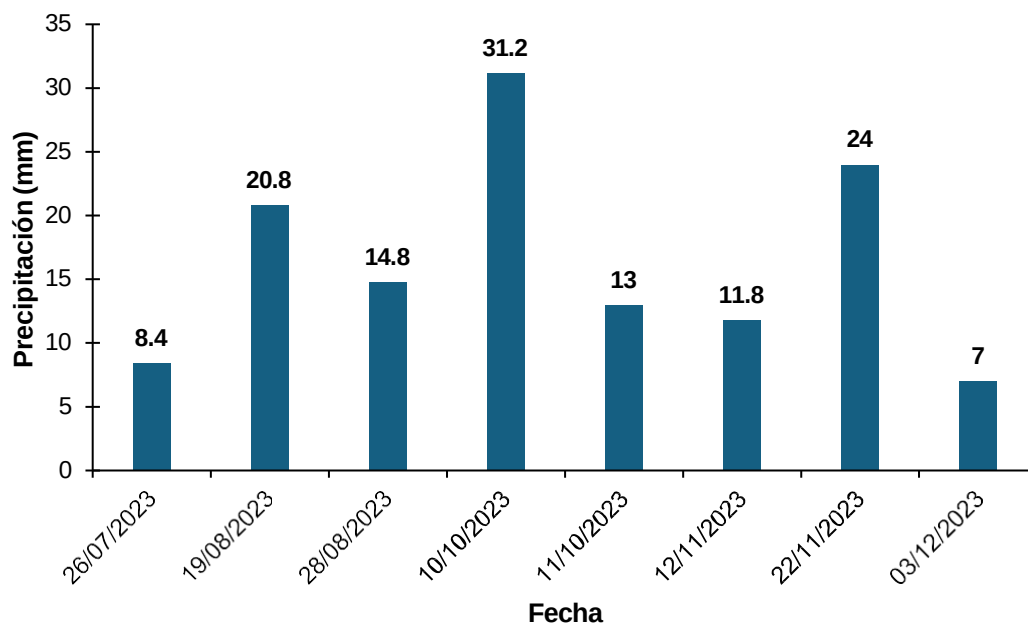


Figura 16. Precipitación de la microcuenca El Maguey.

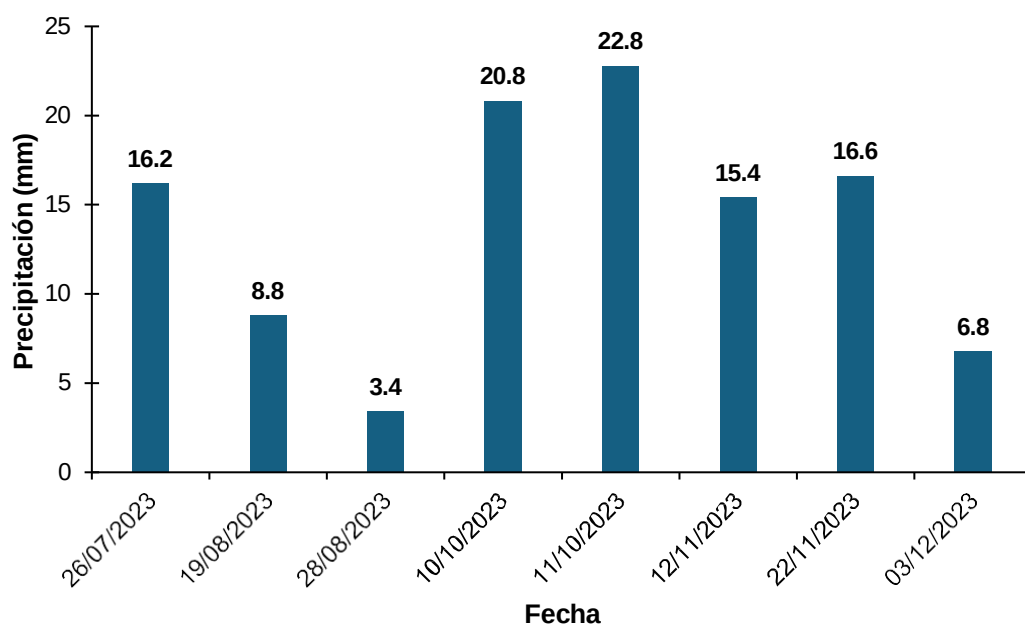


Figura 17. Precipitación de la microcuenca Pánuco.

4.4.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET), representa la cantidad total de agua transferida a la atmósfera mediante la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, es un proceso clave dentro del ciclo hidrológico. Este fenómeno desempeña un papel fundamental en el balance hídrico y debe ser considerado al analizar los eventos de precipitación (Ramírez-Sánchez et al. 2024). Para este estudio se obtuvo mediante la estación meteorológica automatizada marca Davis 6152 Vantage Pro2® para las fechas a analizar como se muestra en la Figura 18.

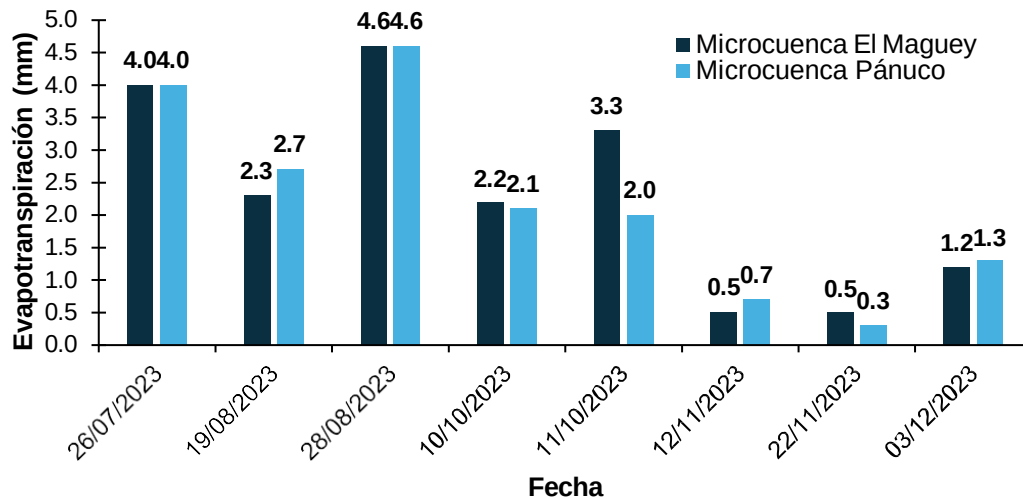


Figura 18. Evapotranspiración (mm) en ambas microcuencas.

4.4.7 Retención por follaje

La retención de agua por follaje bajo condiciones semiáridas y áridas se consideró según estudios realizados por Carlyle-Moses (2004); López et al. (2017); Návar et al. (2008) indican que la retención varía entre el 2% y el 5% de la precipitación total. Para el presente estudio, se seleccionó un valor intermedio de 3.5%.

4.4.8 Esgurrimiento superficial

El esgurrimiento superficial se estimó mediante el método número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EE. UU (SCS, 2004), que permite transformar la precipitación total sobre una superficie en esgurrimiento, utilizando la ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (1)$$

Donde Q es la lámina esgurrida (mm); P es la lámina precipitada (mm); S es la retención potencial máxima (mm); I_a es la abstracción inicial (mm). La ecuación es aplicable si y solo si la $P > I_a$, de otra forma $Q=0$

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

El valor de CN puede tomar valores de 0 a 100, donde 0 representa condiciones de permeabilidad y 100 de impermeabilidad. Según USDA-NRCS (2004) este valor es obtenido de tablas y depende del uso del suelo, condición hidrológica del suelo, para este caso se aplicó pruebas de infiltración en campo (Figura 11) para conocer la máxima tasa de infiltración aplicable para México según McCuen (1998) y grupo hidrológico del suelo, sin embargo, el CN se corrigió por la condición de humedad antecedente (CHA) (Chow et al.,1988) que es la precipitación acumulada de cinco días previos al evento analizado si está es menor a 12.7 mm se considera condición de humedad seca y se calcula con la ecuación 4, por tanto, si la precipitación acumulada es mayor a 38.1 mm es condición húmeda (ecuación 5), sin embargo, si resulta el valor entre 12.7 y 38.1 mm se considera condición de humedad intermedia y no hay cambio de CN, donde CN (II) se obtuvo de tablas (USDA-NRCS, 2004; USDA-SCS, 1986).

$$CN(I) = \frac{4.2 CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (4)$$

$$CN(III) = \frac{23 CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (5)$$



Figura 19. Pruebas de infiltración.

4.4.9 Balance hídrico

Se identificó las entradas (E) y salidas (S), basándonos en el principio de conservación de la masa como se muestra en la ecuación 5 (Sokolov & Chapman, 1974).

$$\Delta A = E - S \quad (5)$$

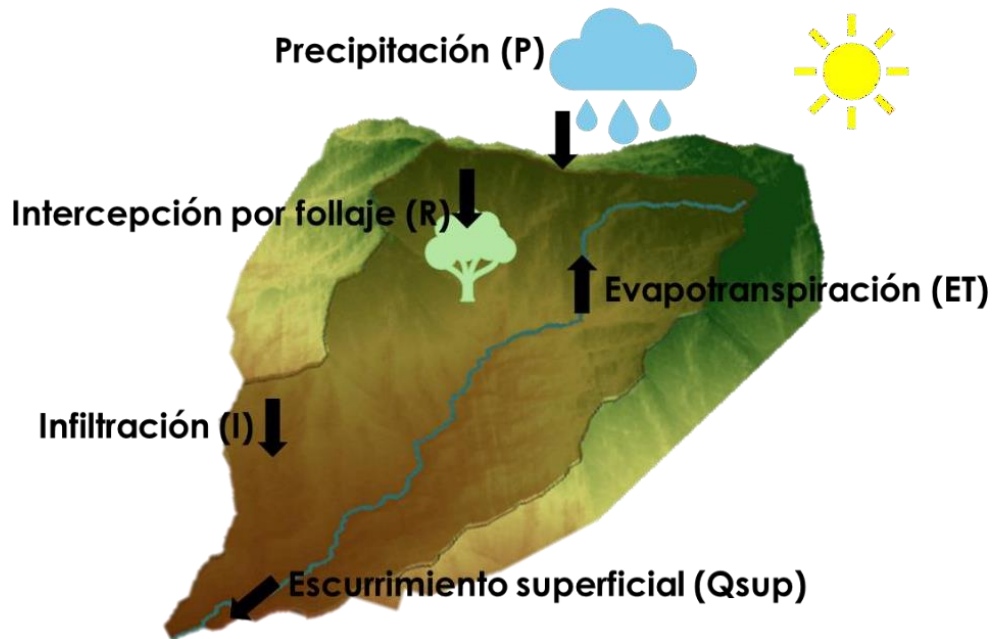


Figura 20. Diagrama del balance hídrico.

4.4.10 Estimación de la infiltración

Para la estimación de la infiltración se realizó un despeje de la ecuación 5 obteniendo la ecuación 6.

$$I = P - Q_{sup} - ET - R \quad ()$$

4.4.11 Modelación de escurrimiento superficial con HEC-HMS

La modelación se realizó empleando el programa HEC-HMS 4.10. se implementó un diagrama general (Figura 21) que representa las etapas de la modelación hidrológica aplicada a las microcuencas objeto de estudio. En este modelo, se definieron las características de la cuenca, incluyendo su superficie, el método de pérdidas basado en el número de curva SCS y la transformación utilizando el hidrograma unitario SCS.

Además, se incorporó una serie temporal de precipitación con intervalos de 15 minutos. Finalmente, se configuró el modelo con especificaciones de control necesarias para ejecutar la simulación, considerando los rangos de tiempo posteriores a la misma.

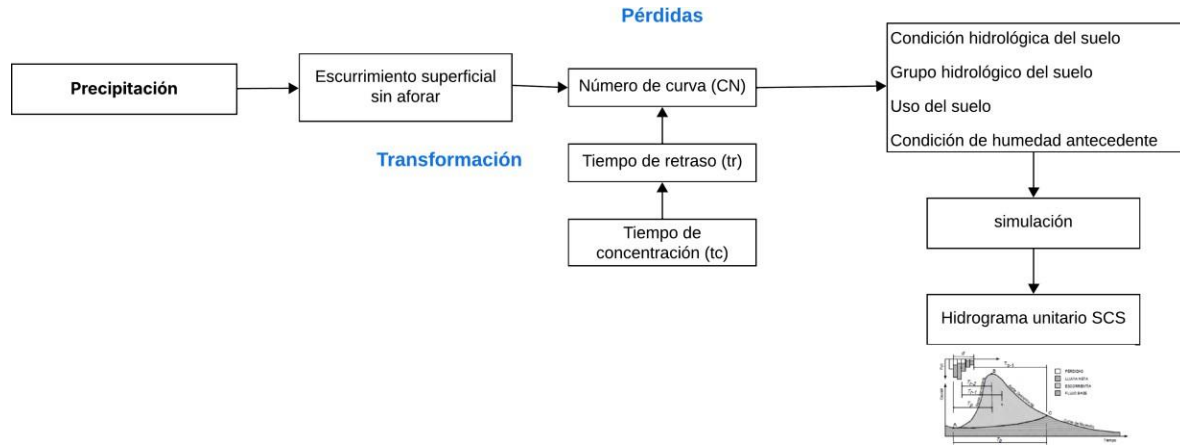


Figura 21. Diagrama general de la modelación hidrológica.

4.4.12 Hidrograma unitario del SCS

Para generar el hidrograma de escurrimiento, que representa la variación temporal del caudal, se utilizó el hidrograma unitario basado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Chow et al., 1988). Para su implementación, se determinó el tiempo de retraso a partir del tiempo de concentración, empleando la ecuación (7) para cuencas pequeñas no aforadas según el Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972) y el USDA-NRCS (2008).

$$tr = 0.6tc \quad (7)$$

Donde t_p es el tiempo al pico a tiempo de retraso y t_c es el tiempo de concentración, obtenido con la ecuación de Kirpich (1940)

$$tc = 0.000054088 \frac{Lc^{1.27}}{H^{0.5}} \quad (8)$$

Donde L_c es la longitud del cauce principal (m) y H es el desnivel del cauce principal (m).

4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la modelación del escurrimiento superficial en el programa HEC-HMS, se utilizaron los datos obtenidos por evento de lluvia. Sin embargo, primero se determinó el número de curva (CN) y posteriormente se realizaron las correcciones según la Condición de Humedad Antecedente (CHA), según USDA (2004).

4.5.1 Caracterización del suelo

Las características físicas del suelo de las microcuencas influyen directamente en su comportamiento hidrológico ante eventos de precipitación. El Maguey presenta suelos franco arenosos, franco arcillosos y arcillosos, con valores materia orgánica de 1.04% a 2.70%, la conductividad hidráulica de hasta 37.34 mm h⁻¹, y capacidad de campo entre valores de 0.2115 a 0.3327 lo que provoca una rápida saturación superficial y, por ende, una mayor generación de escurrimiento bajo lluvias intensas (Rawls et al., 1983). Asimismo, estos valores se ven reflejado en la infiltración por la capacidad del suelo para absorber agua inicialmente, aunque eventualmente se ve superada en condiciones de saturación. Según Zhao et al. (2019), este comportamiento es común en suelos con textura gruesa y baja capacidad de campo, ya que presentan una alta infiltración inicial seguida de saturación rápida.

Sin embargo, en Pánuco con suelos franco arcillosos, franco arenosos y franco arcillo arenosos con alta materia orgánica (3.44% a 5.87 %). De acuerdo con Bronick y Lal (2005), este tipo de suelos presentan mayor estabilidad estructural y capacidad de infiltración, lo cual limita el escurrimiento y favorece el almacenamiento subterráneo. Por otro lado, el valor de capacidad de campo de hasta 0.4062. Estos hallazgos concuerdan con los estudios de Leitinger et al. (2010), quienes destacan el papel de la materia orgánica en la retención de agua en el perfil del suelo y su efecto regulador sobre la dinámica del escurrimiento y la disminución de la evapotranspiración se debe a la saturación del suelo y condiciones atmosféricas húmedas que reducen la demanda evaporativa, como señalan Allen et al. (1998).

Pánuco se comporta como una microcuenca más estable y eficiente, por suelos con alta materia orgánica, texturas finas y baja variabilidad hidráulica, que retienen mayor cantidad de agua y limitan el escurrimiento superficial, incluso bajo condiciones de lluvia intensa. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios de zonas semiáridas y montañosas (Silva et al., 2019; Servín-Palestina et al., 2022).

4.5.2 Número de curva

Los resultados del Cuadro 6 muestran un CN ponderado de 79.15 para la microcuenca el Maguey, que refleja una condición hidrológica influenciada principalmente por el pastizal, que representa el 77.89% del área total y tiene un CN 79 debido a su condición regular y grupo hidrológico C caracterizado por baja capacidad de infiltración. Estas características, junto con el matorral (15.71%) y su CN de 81 resaltan la importancia del uso del suelo y la cobertura vegetal en la dinámica de escurrimiento y recarga potencial, como menciona Ramírez-Sánchez et al. (2024). La comparativa con modelos similares sugiere que el CN ponderado obtenido es consistente con lo reportado por Ajmal et al. (2016) y Singh et al. (2023) quienes destacaron la efectividad del método SCS-CN en la predicción del escurrimiento superficial en cuencas con características similares. Sin embargo, la elevada proporción de suelo en condiciones regulares, asociada al grupo hidrológico D puede limitar la infiltración y aumentar el volumen de escorrentía, como también han señalado Kowalik y Walega (2015) en su análisis de suelos agrícolas con características pobres de infiltración.

Además, el bosque y la vegetación de galería, aunque representan un porcentaje reducido del área (2.51% cada uno) y tienen un CN relativamente bajo (76) contribuyen a mitigar el impacto hidrológico al mejorar las condiciones de infiltración en áreas específicas. Estos hallazgos son coherentes con los estudios de Angulo y Saavedra (2018), quienes destacaron la importancia de los parches de vegetación en la regulación hidrológica.

Cuadro 7. Número de curva de la microcuenca El Maguey.

Uso de suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)	Condición hidrológica del suelo	Grupo hidrológico del suelo	CN
Cuerpo de agua	9.00	0.71			98
Bosque	32.00	2.51	Regular	B	48
Barreras vivas <i>Opuntia</i> spp.	8.43	0.66	Buena	C	79
Pastizal	991.57	77.89	Mala	C	79
Matorral	200.00	15.71	Regular	C	81
Vegetación de galería	32.00	2.51	Regular		98
Total	1,273.00	100.00		CN ponderado	79.15

Para la microcuenca Pánuco el CN ponderado de 80.12 mostrado en el Cuadro 7 y obtenido en este análisis refleja el impacto combinado de los diferentes usos del suelo y sus condiciones hidrológicas. El pastizal que abarca el 70.02% del área total con un CN de 79 y una condición regular dentro del grupo hidrológico C contribuye a la respuesta hidrológica de la microcuenca. Este patrón es similar al reportado por Ramírez-Sánchez et al. (2024), donde el uso de suelo predominante determinó el comportamiento del escurrimiento superficial. El matorral, que cubre el 26.11% del área total tiene un CN 81, debido a su condición regular y su pertenencia al grupo hidrológico C, caracterizado por una baja capacidad de infiltración. Los suelos desnudos, zonas urbanas y cuerpos de agua, aunque representan porcentajes menores del área (0.62%, 2.13% y 0.14%, respectivamente) tiene un impacto considerable al tener un CN elevado (98) lo que aumenta el volumen de escurrimiento superficial. Estos valores coinciden con estudios como los de Kowalik y Walega (2015), que destacan la influencia de superficies impermeables en la dinámica hidrológica.

Por otro lado, el área agrícola, aunque representa solo el 0.98% del total, tiene un CN de 84 asociado a su condición mala dentro del grupo hidrológico C lo que también contribuye al aumento de la escorrentía. Estos hallazgos refuerzan la importancia de gestionar adecuadamente el uso del suelo y su cobertura tal como sugieren Ajmal et al. (2016) y Singh et al. (2023) para minimizar los efectos negativos sobre el balance hidrológico y favorecer la recarga de acuíferos.

Cuadro 8. Número de curva de la microcuenca Pánuco.

Uso de suelo	área (ha)	Porcentaje (%)	Condición hidrológica del suelo	Grupo hidrológico del suelo	CN
Suelo desnudo	7.00	0.62			98
Agrícola	11.00	0.98	Mala	C	84
Matorral	294.00	26.11	Regular	B	81
Pastizal	788.40	70.02	Regular	C	79
cuerpo de agua	1.60	0.14			98
Zona urbana	24.00	2.13			98
Total	1,126.00	100.00		CN ponderado	80.12

La Figura 13 muestra las fechas de los eventos de precipitación analizados y las de los cinco días previos, lo que permitió determinar la humedad antecedente para cada fecha y, asimismo, corregir el valor de CN según Chow et al., (1988).

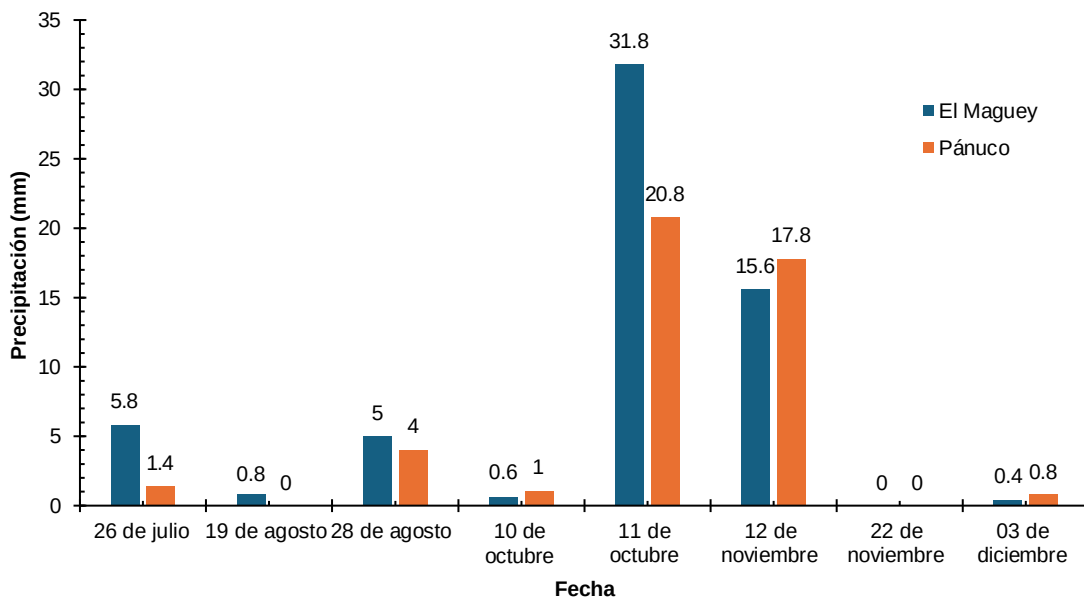


Figura 22. Precipitación registrada para la humedad antecedente.

Una vez obtenido la CHA y el nuevo valor de CN se aplicó el análisis según SCS (2004) que la precipitación debe ser mayor a la abstracción inicial, de lo contrario el valor del escurrimiento superficial es igual a 0. Por lo tanto, las fechas a analizar fueron con condición de humedad intermedia, debido a que la precipitación acumulada de los cinco días previos a los eventos de lluvia resultó en un rango de 12.7 a 38.1 mm (Cuadro 8).

Cuadro 9. Condición de humedad antecedente por evento de lluvia.

No.	Fecha	Condición de Humedad Antecedente (CHA)		Número de curva (CN)		Precipitación (mm)	
		Maguey	Pánuco	Maguey	Pánuco	Maguey	Pánuco
1	26/07/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	8.40	15.20
2	19/08/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	20.80	7.40
3	28/08/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	14.00	3.40
4	10/10/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	20.60	17.20
5	11/10/2023	CHA II	CHA II	79.15	80.12	16.60	23.60
6	12/11/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	9.80	14.00
7	22/11/2023	CHA II	CHA II	79.15	80.12	23.60	15.29
8	03/12/2023	CHA I	CHA I	61.45	62.86	7.00	6.80

CHA I=Condición de humedad seca

CHA II= Condición de humedad intermedia

4.5.3 Balance hídrico

Una vez identificadas los componentes del balance hídrico, se realizó el cálculo para ocho eventos de lluvia de ambas microcuencas. Para este análisis, se consideró SCS (2004) que establece que el escurrimiento (Q_{sup}) solo ocurre si la precipitación (P) excede la abstracción inicial (I_a) de otra forma $Q=0$. Con base a este criterio, los eventos considerados en las figuras 19 y 21 fueron válidos para el análisis del balance hídrico, debido a la condición de humedad que pertenecen. Este resultado coincide con las investigaciones de Ramírez-Sánchez et al. (2024), Lal et al. (2019) y Ajmal (2016), quienes resaltan la importancia de considerar estas variables en los estudios hidrológicos.

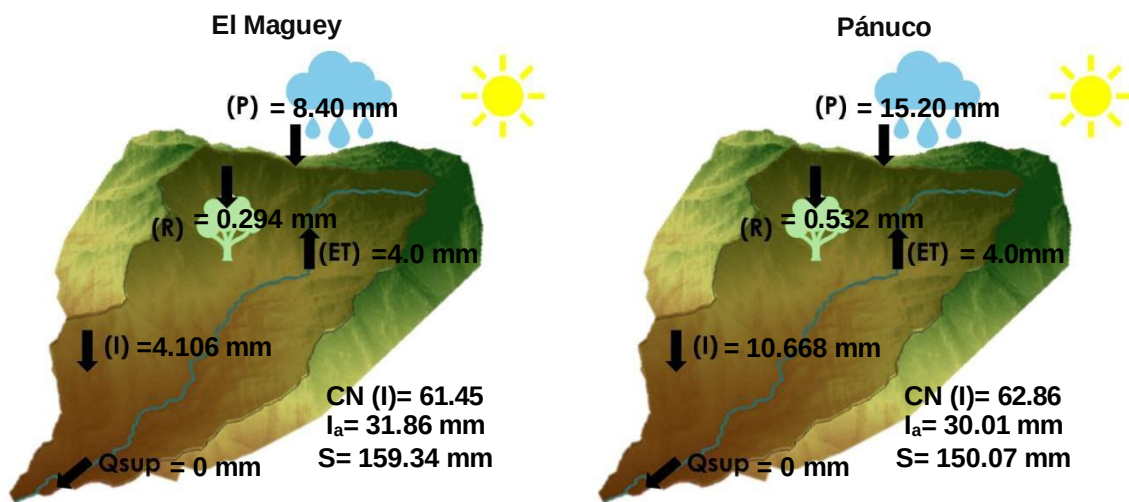


Figura 23. Balance hídrico para el evento de lluvia 26 de julio del 2023.

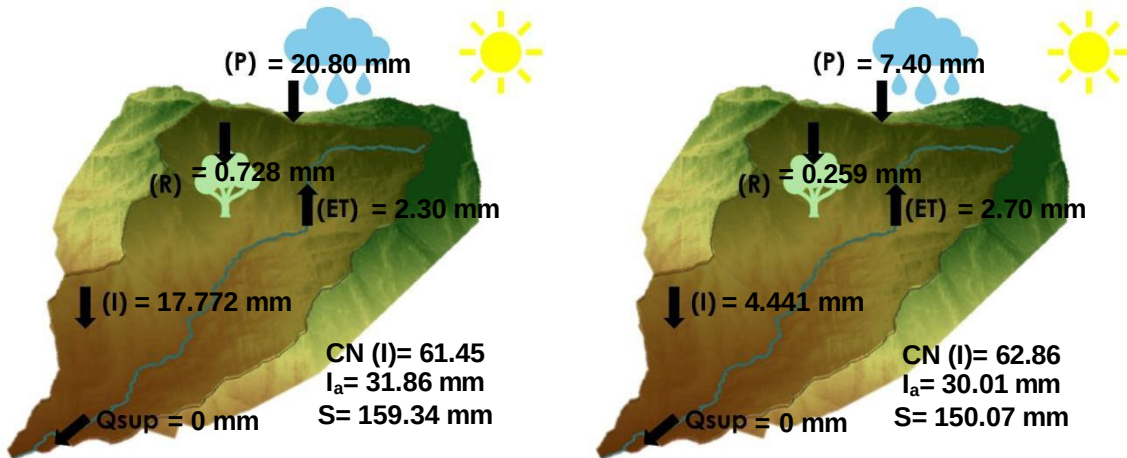


Figura 24. Balance hídrico para el evento de lluvia 19 de agosto del 2023.

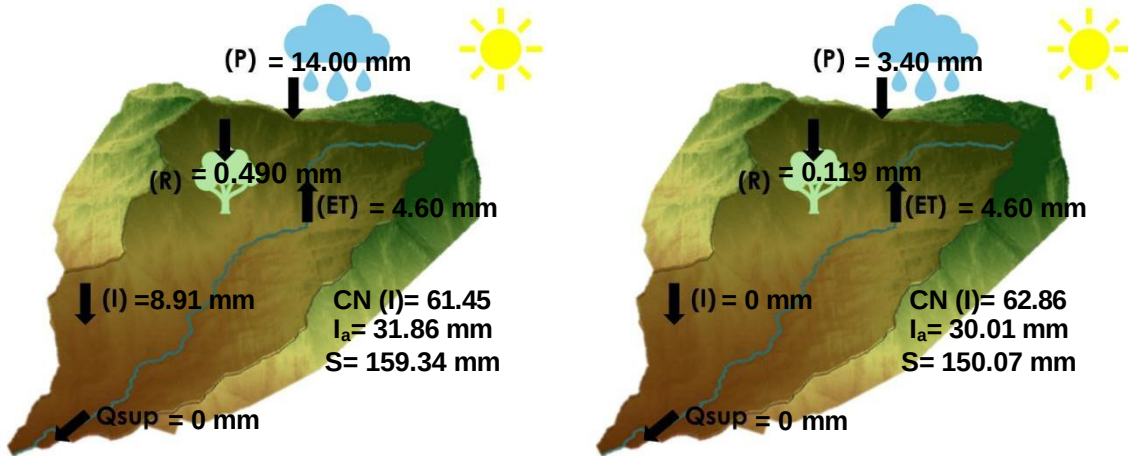


Figura 25. Balance hídrico para el evento de lluvia 28 de agosto del 2023.

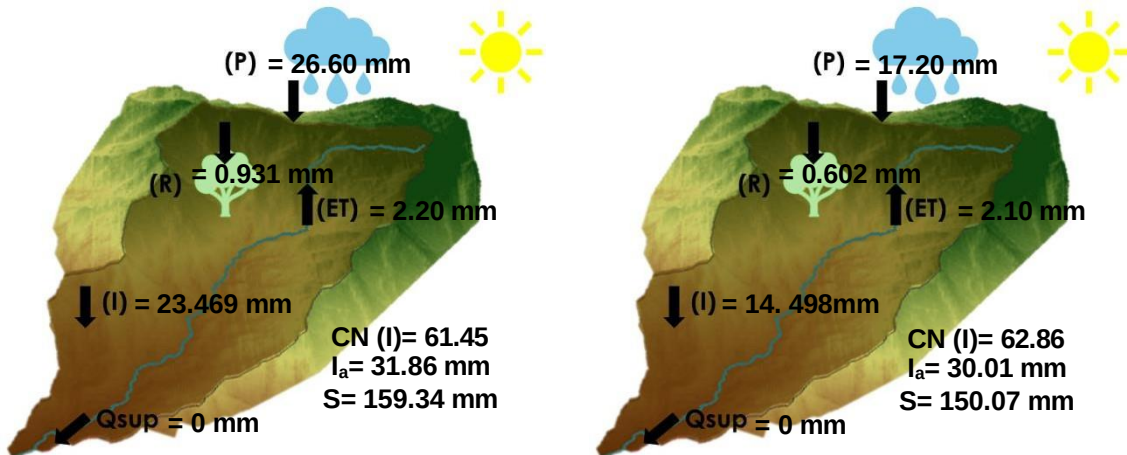


Figura 26. Balance hídrico para el evento de lluvia 10 de octubre del 2023.

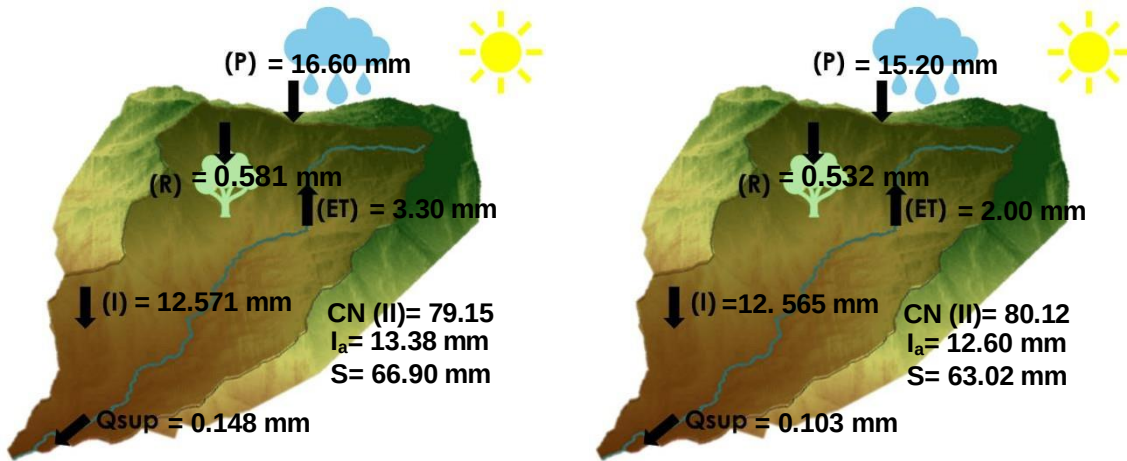


Figura 27. Balance hídrico para el evento de lluvia 11 de octubre del 2023.

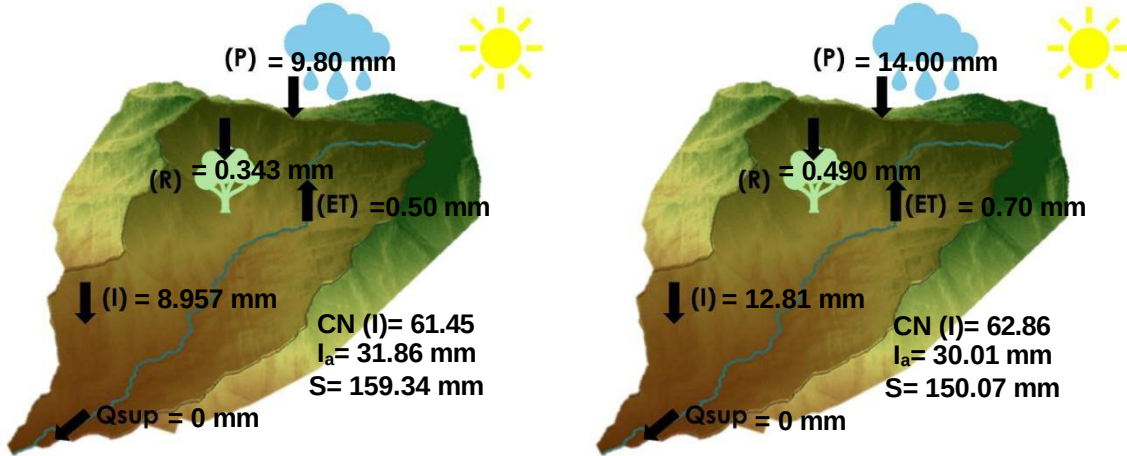


Figura 28. Balance hídrico para el evento de lluvia 12 de noviembre del 2023.

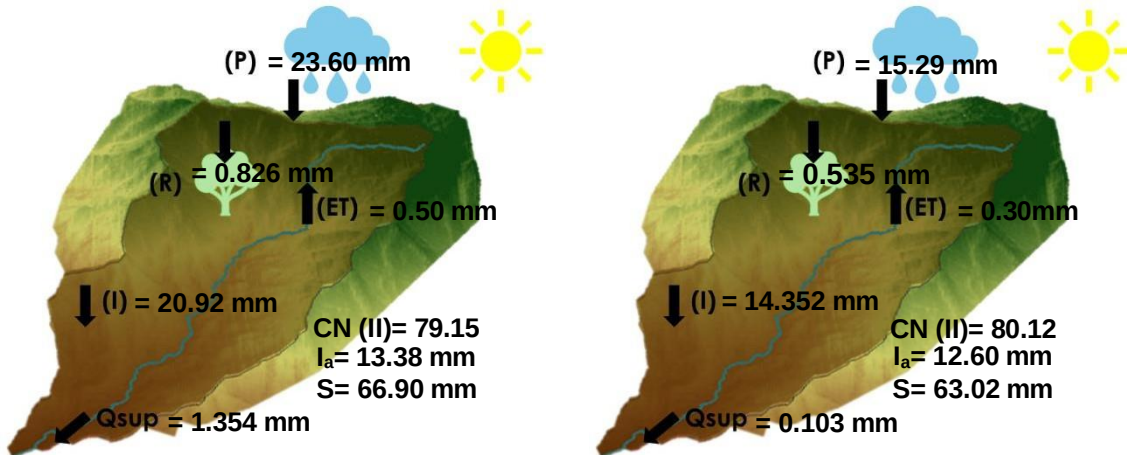


Figura 29. Balance hídrico para el evento de lluvia 22 de noviembre del 2023.

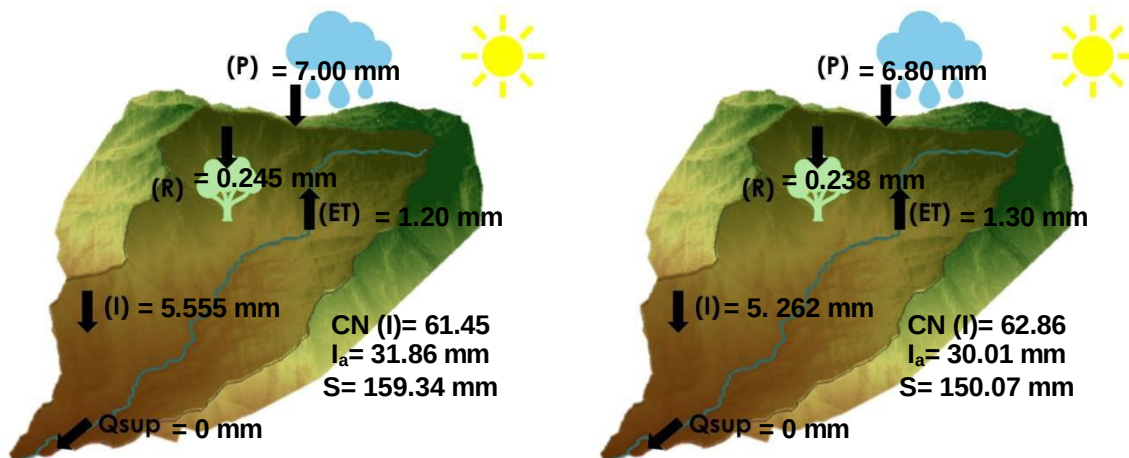


Figura 30. Balance hídrico para el evento de lluvia 03 de diciembre del 2023.

4.5.4 Modelación de escurrimiento superficial

Una vez corregido el número de curva se realizó la simulación del modelo de HEC-HMS con los parámetros que se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 10. Parámetros para la modelación en HEC-HMS.

Fecha	Superficie (km ²)		Número de curva (CHA II)		Abstracción inicial (mm)		Tiempo de retraso (min)	
	Maguey	Pánuco	Maguey	Pánuco	Maguey	Pánuco	Maguey	Pánuco
11/10/2023	12.72	11.26	79.15	80.12	13.38	12.60	14.54	9.86
22/11/2023								

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la simulación en HEC-HMS de los dos eventos de lluvias para cada microcuenca en el Maguey con presencia de barreras vivas con nopal y Pánuco sin barreras vivas.

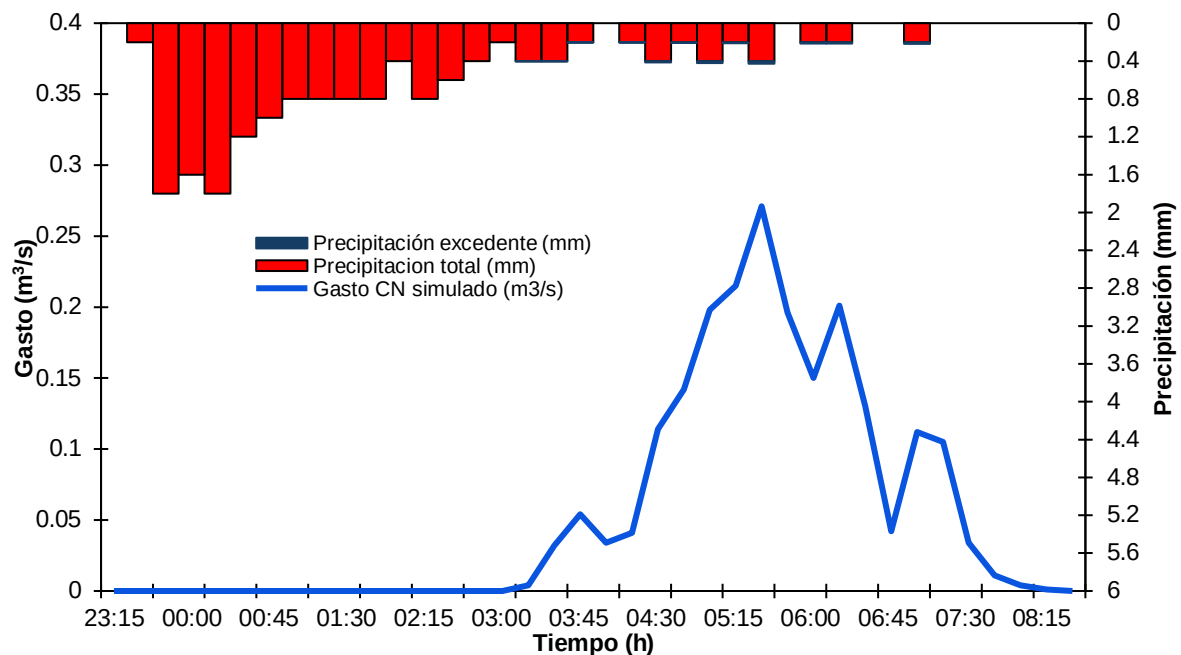


Figura 31. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca el Magüey para el evento de lluvia del 11 de octubre 2023.

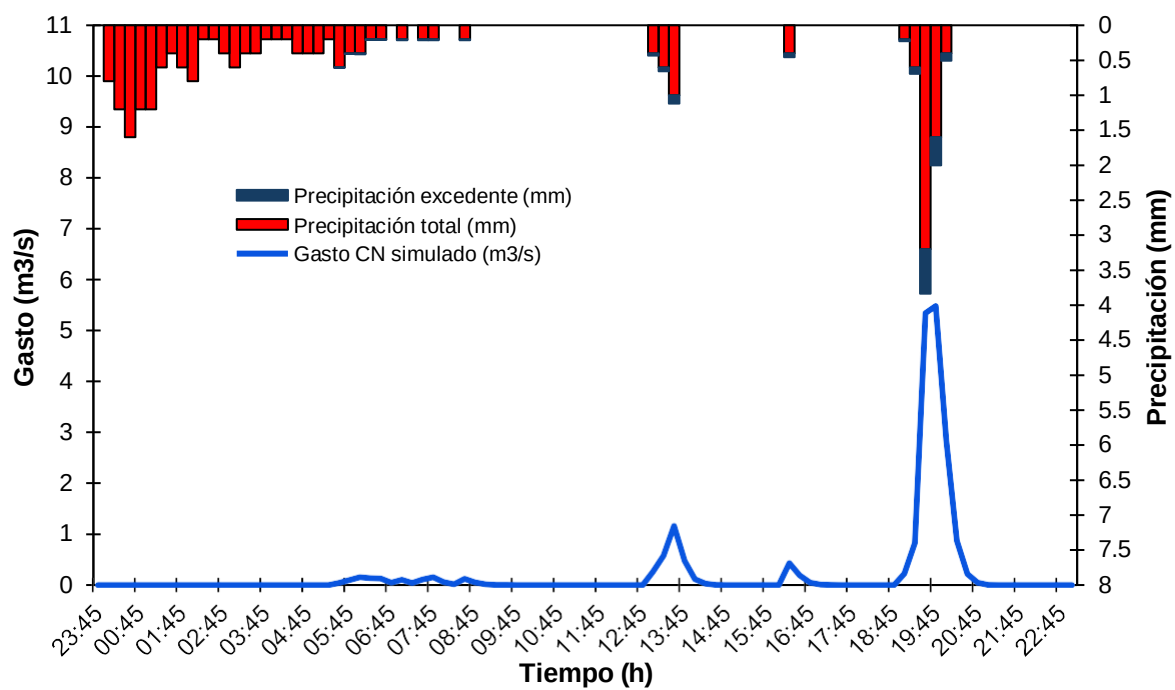


Figura 32. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.

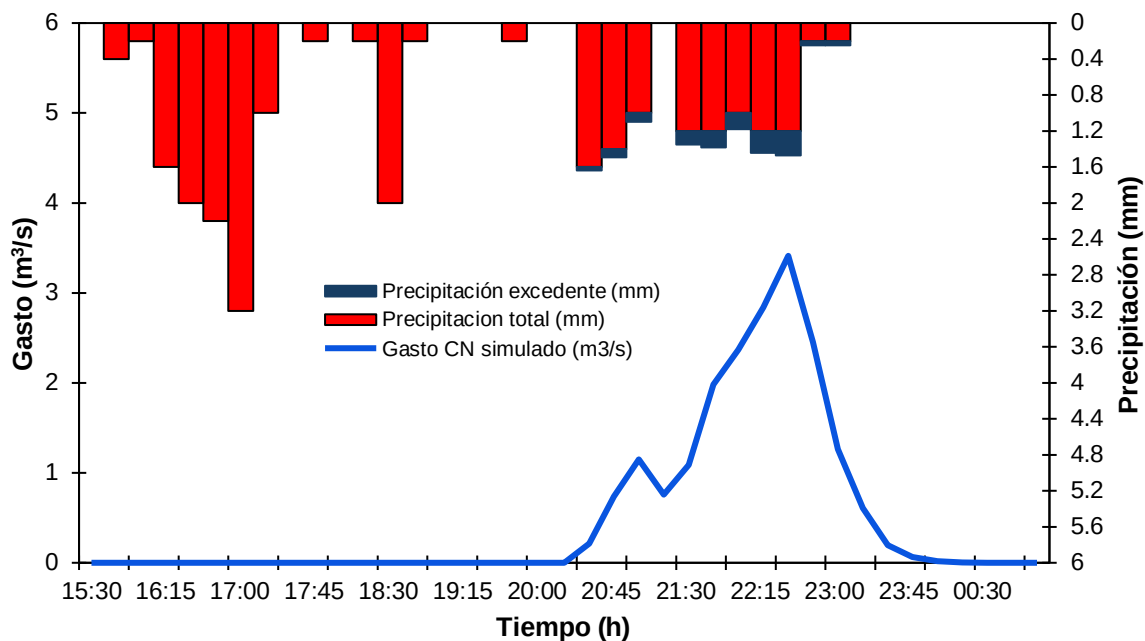


Figura 33. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca el Magüey para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023.

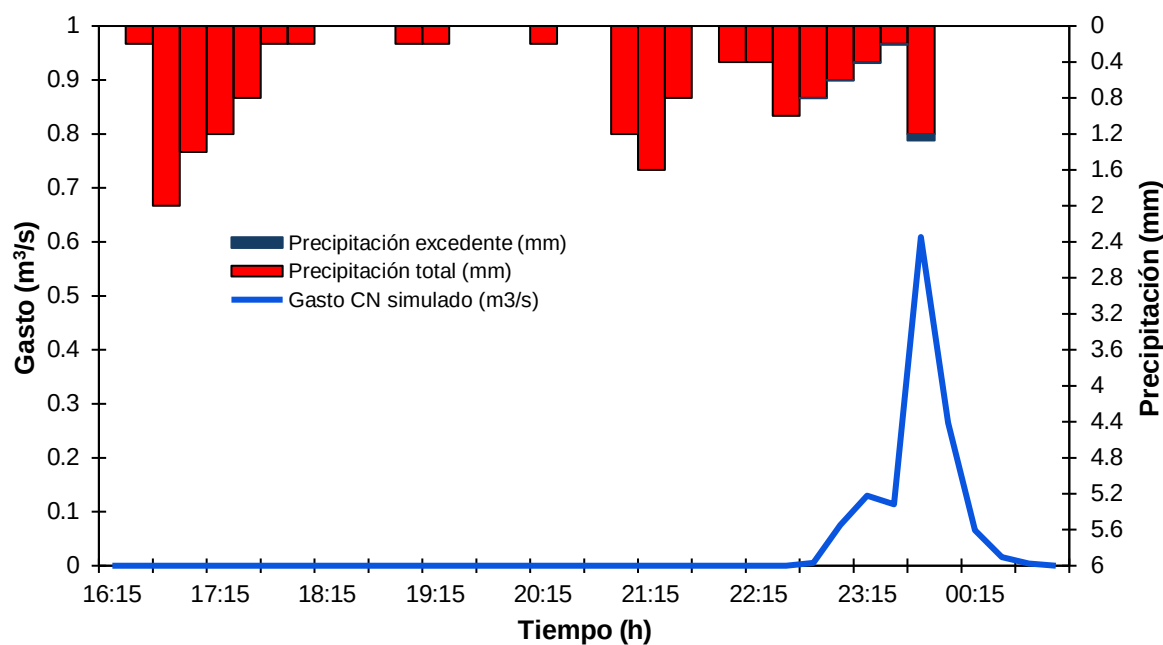


Figura 34. Simulación lluvia-escurrimiento utilizando HEC-HMS en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023.

Los resultados del balance hídrico (Cuadro 11) para los eventos del 11 de octubre y 22 de noviembre muestran diferencias en el comportamiento hidrológico entre las microcuencas, influenciadas por la distribución temporal y magnitud de la precipitación.

Sin embargo, la precipitación con valor de 23.60 mm para ambas microcuencas el escurrimiento superficial es mayor en Pánuco de 18,387.58 m³ en comparación del Maguey de 17,236.420 m³. Asimismo, el escurrimiento pico también fue mayor en Pánuco (5.476 m³/s) que en Maguey (3.412 m³/s). Estas diferencias se atribuyen a los factores topográficos y de la cobertura del suelo, Pánuco presenta una pendiente media de cuenca de 1.69% y de cauce principal de 3.88%, mientras que en El Maguey son de 1.40% y 1.81%, respectivamente. Dichas características topográficas, combinadas con las características morfométricas generales casi similares en ambas microcuencas, favorecen una mayor concentración del flujo superficial. Además, la implementación de barreras vivas de nopal puede haber influido en la reducción del escurrimiento por el valor de rugosidad (0.035 para Maguey y 0.030 para Pánuco) y la capacidad de retención de las barreras contribuyen a un mayor tiempo de concentración en El Maguey (24.24 min) en comparación con Pánuco (16.44 min), lo que favorece una menor concentración del flujo superficial. Estos resultados coinciden con Buitrago et al. (2023), Biswas et al. (1999) y Horton (1932), quienes destacan que la forma de la cuenca y la pendiente afectan significativamente la respuesta hidrológica. De igual manera, Lux (2016) y Esper-Angillieri & Perucca (2014) indican que cuencas con tiempos de concentración menores tienden a generar crecidas rápidas y de corta duración.

La intensidad de lluvia es un factor importante que influye en las variables del balance hídrico, por la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos (McGauley et al., 2023). Como se muestran en las figuras 36 y 37, en Pánuco se observan picos de intensidad muy altos de 28 mm/h y en el Maguey muy altas de 38.6 mm/h a 58.4 mm/h, sin embargo, el valor del escurrimiento para este evento en el Maguey sigue siendo menor, siendo que el valor de la infiltración en volumen de 266,311.600 m³. lo que puede explicarse cabe señalar que esta microcuenca existe barreras vivas con nopal, aspectos importantes de la cobertura vegetal señalados por Ramírez-Sánchez et al. (2024), Carrillo-Martínez et al. (2021) y Phetprayoon (2015) como factores determinantes en la generación de escurrimiento. Además, las barreras vivas juegan un papel importante al retener el agua durante los momentos de mayor intensidad, facilitando su infiltración gradual.

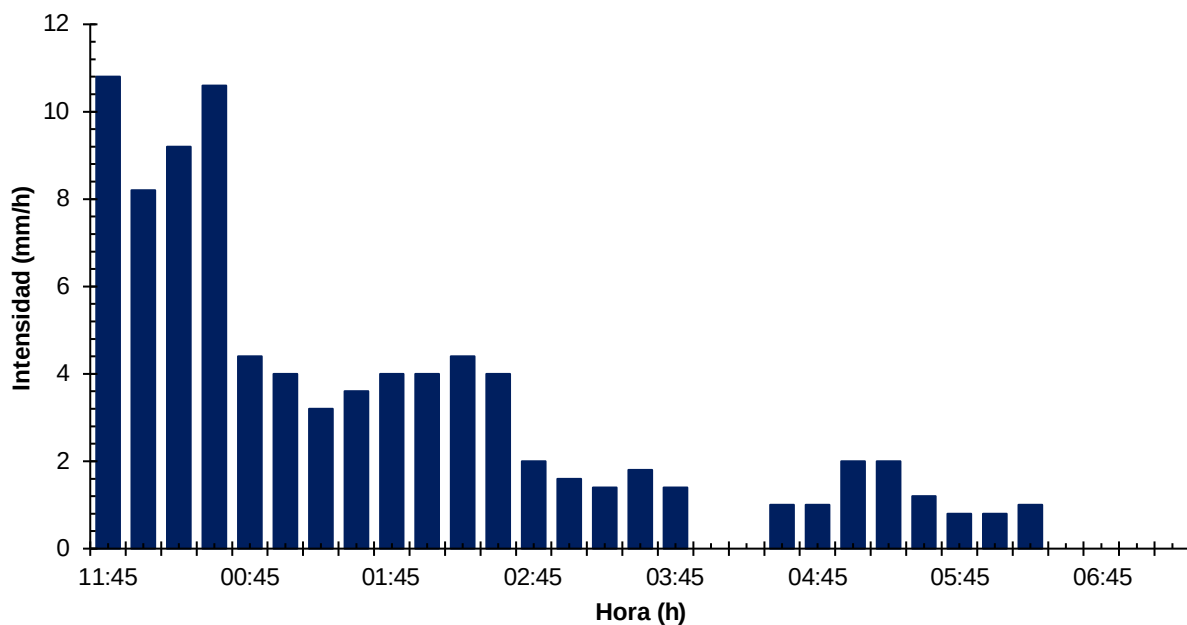


Figura 35. Intensidad de la lluvia en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.

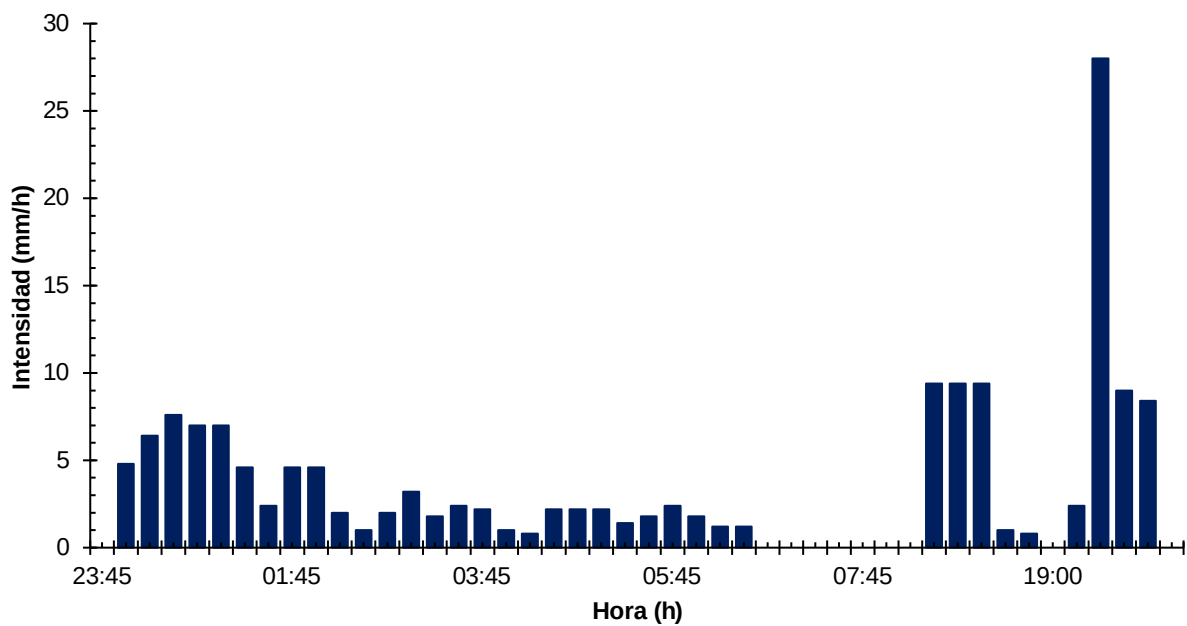


Figura 36. Intensidad de la lluvia en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 11 de octubre 2023.

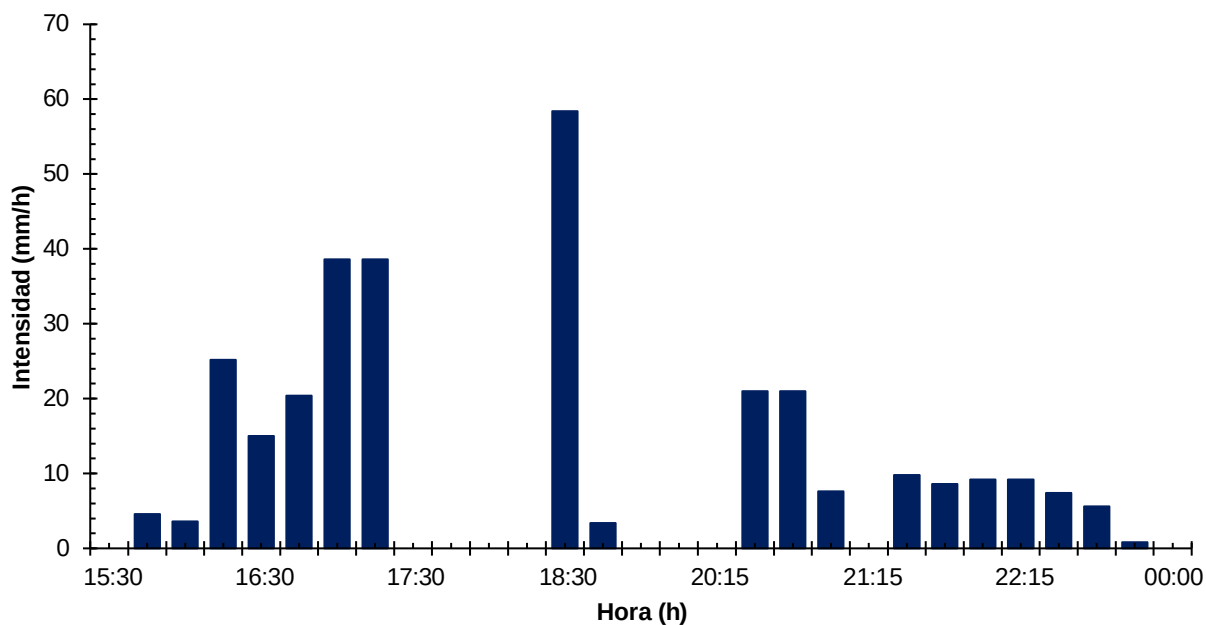


Figura 37. Intensidad de la lluvia en la microcuenca el Maguey para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023.

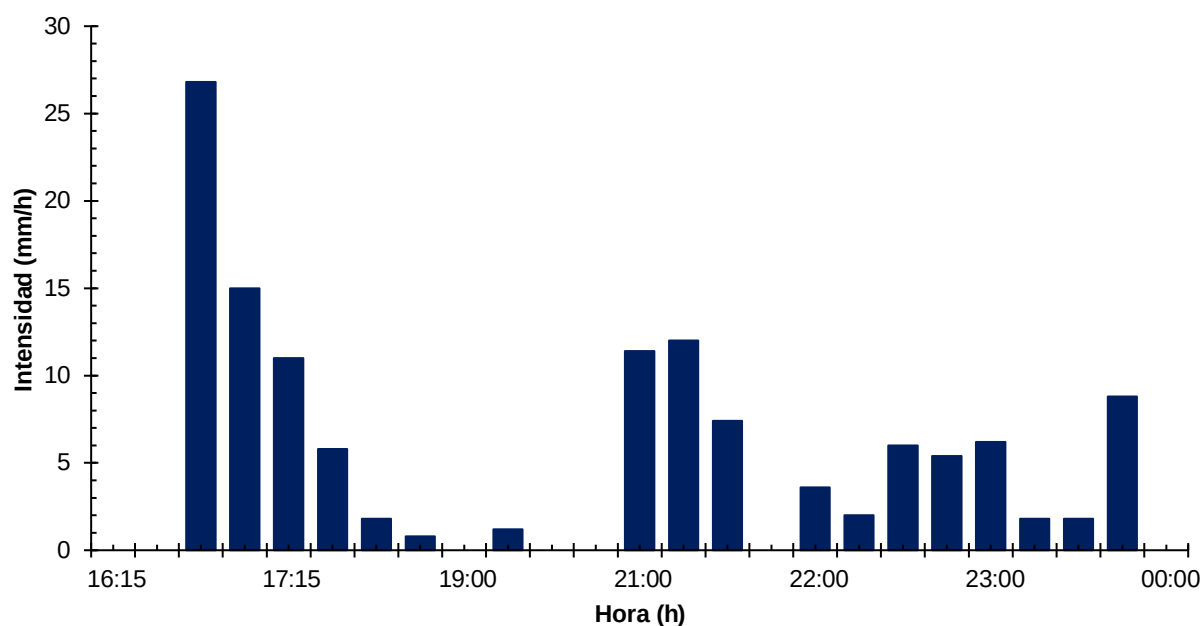


Figura 38. Intensidad de la lluvia en la microcuenca Pánuco para el evento de lluvia 22 de noviembre 2023.

La evapotranspiración fue también superior en el Maguey (42,009.00 m³) en comparación con Pánuco (22,520.00 m³), debido a una mayor cobertura vegetal y las condiciones de

humedad en el suelo que reducen la demanda evaporativa, como señalan Allen et al. (1998). Finalmente, la retención por follaje mostró valores similares en ambas microcuencas, lo cual indica una distribución comparable de vegetación interceptora o características estructurales del follaje.

Para la precipitación del Maguey de 16.60 mm y 15.20 para Pánuco. Sigue reflejando nuevamente en el balance hídrico con resultados más altos en el Maguey, confirmando su mayor respuesta hidrológica ante eventos de lluvia, lo cual destaca la influencia de los factores morfométricos, edáficos y el uso de suelo en la dinámica hidrológica local (Cuadro 11).

Cuadro 11. Balance hídrico en volumen y lámina de las microcuencas.

Variables/fecha/microcuenca	11 de octubre de 2023		22 de noviembre de 2023	
	El Maguey	Pánuco	El Maguey	Pánuco
Precipitación total (mm)	16.600	23.600	23.600	15.200
Precipitación total (m ³)	211,318.000	300,428.000	300,428.000	171,152.000
Escurrecimiento superficial (mm)	0.148	1.633	1.354	0.103
Escurrecimiento superficial (m ³)	1,884.040	18,387.58	17,236.420	1,159.780
Infiltración (mm)	12.571	19.141	20.920	14.256
Infiltración (m ³)	160,028.830	215,527.66	266,311.600	160,455.000
Evapotranspiración (mm)	3.300	2.000	0.500	0.300
Evapotranspiración (m ³)	42,009.000	22,520.000	6,365.000	7,882.000
Retención por follaje (mm)	0.581	0.826	0.826	0.532
Retención por follaje (m ³)	7,396.130	9,300.760	10,514.980	5,990.320
Escurrecimiento pico (m ³ /s)	0.271	5.476	3.412	0.103

4.6 CONCLUSIONES

La integración de herramientas como HEC-HMS con caracterización del suelo y las microcuencas, uso de suelo y cobertura vegetal permite una simulación precisa de respuestas hidrológicas a eventos extremos. Dichos análisis son base para desarrollar estrategias efectivas de manejo de cuencas hidrográficas, prácticas de conservación del suelo e iniciativas de planificación de tierras que mitiguen la escorrentía superficial y mejoren la recarga de agua. Sin embargo, la validación de la efectividad del modelo HEC-HMS en regiones áridas y semiáridas requiere la recolección de datos de escorrentía superficial. Además, la presencia de barreras vivas en la microcuenca el Maguey

contribuyó a reducir el escurrimiento superficial, lo cual se refleja en un mayor coeficiente de rugosidad y en un tiempo de concentración más prolongado. Estas estructuras vegetativas demostraron mejorar el balance hídrico mediante el aumento de la retención hídrica, la reducción de escurrimiento superficial y aumento de la infiltración aun con valores de intensidades altos.

4.7 Literatura citada

- Ajmal, M., Khan, T. A., & Kim, T. W. (2016). A CN-based ensembled hydrological model for enhanced watershed runoff prediction. *Water*, 8(1), 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8010020>
- Alarcón, N. A., Chávez, M. J., Palacios, V. O., & Ibáñez, C. L. (2020). Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas: Morelia, Michoacán, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(3), 1-26
- Angulo, M. A., & Saavedra, O. C. (2018). modelación hidrológica de la cuenca maylanco utilizando hec-hms. *investigacion & desarrollo*, 18(1), 53–67
- Boitrigo, S. A., Lima, L. F. A., Lima, F. A., Leite, M. E., & Costa, L. R. F. D. (2023). Aplicação do Modelo HEC-HMS para Simulação do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Vieiras. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(4), 2091–2102. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v16.4.p2091-2102>
- Carrillo-Martínez, C. J., Álvarez-Fuentes, G., Aguilar-Benítez, G., Can-Chulím, Álvaro, & Pinedo-Escobar, J. A. (2021). Calidad del agua para riego agrícola en la región del acuífero Calera en Zacatecas, México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 12(2), 01-58. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-01>
- Chow, V. T., Maidment, D., and Mays, L. W., (1988). *Applied Hydrology*. McGraw Hill. International Edition. (p .149)
- Dávila, F. M., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Bautista-Capetillo, C., Echavarria-Cháirez, F. G., Garbrecht, J. D., ... & Hernandez, J. (2012). Calibration of SWAT2009 using crop biomass, evapotranspiration, and deep recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(07), 439.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México.

- Girón-Méndez, P., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2023). Hydrological model with imerg images of the Coahuayana river Basin, Jalisco, Mexico. *Agrociencia*
- IUSS *Grupo de Trabajo WRB. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103.* FAO. Roma. 2007.
- Lal, M., Lal, M., Mishra, S. K., & Kumar, M. (2019). Reverification of antecedent moisture condition dependent runoff curve number formulae using experimental data of Indian watersheds. *Catena*, 173, 48–58. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.09.002>
- Martínez Esquivel, E. G. (2023). *Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca río Chapingo* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).
- Montiel Gonzaga, R., Prado Hernández, J. V., Vázquez Peña, M. A., Ibáñez Castillo, L. A., & Pascual Ramírez, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 291-301.
- McGauley, M. W., Amur, A., Shakya, M., & Wadzuk, B. M. (2023). A Complete Water Balance of a Rain Garden. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2023wr035155>
- Natural Resources Conservation Service -United State Department Agriculture (NRCS-USDA). 2004 b. National Engineering Handbook Hydrology Part 630_Chapter 9. Obtenido de <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch9.pdf>
- Phetprayoon, T. (2015). Application of GIS-based Curve Number Method for Runoff Estimation in Agricultural-Forest Watershed, Thailand. *KKU Research Journal*, 20(2), 155–167. <https://doi.org/10.14456/kkurj.2015.13>
- Ramírez-Sánchez, D., Prado-Hernández, J. V., Buendía-Espinoza, J. C., García-Núñez, R. M., & Rodríguez-Acosta, M. (2024). Influencia de la cobertura vegetal y uso de suelo en la recarga potencial de acuíferos. *Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible*, 11.
- Saxton, K. E., (2006). Soil water characteristic. USDA Agricultural Research Service. Departament of Biological Systems Engineering Washington State University. Versión 6.02.74.
- SCS (1972), retomada de McCuen RH (1998) Hydrologic Analysis and Design. Department of civil engineering, University of Maryland. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp: 155-163.

Singh, H., Alam, M. A., Sharma, P. J., & Rautela, K. S. (2023). A comparison of the SCSCN-based models for hydrological simulation of the Aghanashini River, Karnataka, India. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(4), 507-519.

USDA-SCS (1986) Hidrología urbana para pequeñas cuencas hidrográficas. Publicación técnica n.º 55 (TR-55). USDASCS, Washington D. C.